N° d'ordre 455 Année 1971

THÈSE

présentée à l'Université Paul Sabatier de Toulouse

en vue de l'obtention

du Grade de Docteur ès-Sciences Physiques

par

Pierre JOSSERAND

Maître Assistant à l'Université Paul Sabatier

Contribution à la métrologie des grandeurs acoustiques d'environnement

Soutenue le 3 novembre 1971 devant la Commission d'Examen

MM. LAGASSE — Président

BERNARD
CAMBOU
CITTI
GUILLIEN
MATTEI

— Examinateurs

N° d'ordre 455

Année 1971

THÈSE

présentée à l'Université Paul Sabatier de Toulouse

en vue de l'obtention

du Grade de Docteur ès-Sciences Physiques

par

Pierre JOSSERAND

Maître Assistant à l'Université Paul Sabatier

Contribution à la métrologie des grandeurs acoustiques d'environnement

Soutenue le 3 novembre 1971 devant la Commission d'Examen

MM. LAGASSE — Président

BERNARD
CAMBOU
CITTI
GUILLIEN
MATTEI
— Examinateurs

UNIV.
LEIDEN

UNIVERSITE PAUL SABATIER TOULOUSE

DIRECTION DE L'UNIVERSITE

M. LARENG.....Président
M. MATHIS.....1er Vice-Président
M. MARTIN.....2eme Vice-Président

S C I E N C E S

HONORARIAT

M. BLAIZOT..... Doyen Honoraire
M. CAPDECOMME.....Doyen Honoraire, Recteur honoraire
M. DELTHEIL..... Doyen honoraire, Recteur honoraire, Professeur honoraire
M. DUPOUY..... Membre de l'Institut, Doyen honoraire Directeur Général honoraire du C.N.R.S Professeur honoraire.
M. DURAND..... Doyen honoraire
M. FOUCHE..... Professeur honoraire
M. GAUSSENS..... Professeur honoraire, Correspondant de l'Institut.
M. JACQUES..... Professeur honoraire
M. MIGNONAC..... Professeur honoraire
M. MORQUER..... Professeur honoraire, Correspondant de l'Institut
M. SECONDAT..... Professeur honoraire
M. TEISSIE-SOLIER..... Professeur honoraire
M. VANDEL..... Professeur honoraire, Membre de l'Institut
M. MATHIS..... Doyen honoraire

PROFESSEURS

M. ESCANDE..... Mécanique des Fluides, Membre de l'Institut
M. CASTERAS..... Géologie, Correspondant de l'Institut
M. BEDOS..... Chimie
M. CAPDECOMME..... Minéralogie
M. NOUVEL..... Biologie Générale
M. GALLAIS..... Chimie, Correspondant de l'Institut
M. DURAND..... Physique
M. FERT..... Physique
M. DIEHL..... Agronomie
M. LESBRE..... Chimie organique
M. BRUNEL..... Physiologie Végétale
M. HURON..... Mathématiques Appliquées
M. MARGULIS..... Pédologie
M. TRICHE..... Chimie Analytique et Spectrographie
M. LEDOUX..... Zoologie Appliquée
M. RIVALS..... Agriculture

M. PERRIER..... Physique
M. MATHIS..... Chimie
M. ORLIAC..... Géochimie et Minéralogie
M. LAFOURCADE..... Physique
M. ANGELIER..... Zoologie
Mlle de FERRE..... Botanique
M. FARRAN..... Minéralogie et Géotechnique
M. LAUDET..... Physique Théorique et Calcul Numérique
M. SERFATY..... Biologie animale
M. NOUGARO..... Hydraulique Générale et Appliquée
M. LAGASSE..... Electrotechnique
M. GARDY..... Génie chimique
M. BLANC..... Physique nucléaire
M. BIREBENT..... Electronique Appliquée
M. VOIGT..... Chimie Minérale
M. LEREDDE..... Botanique
M. LELUBRE..... Géologie
M. TROCHAIN..... Botanique
M. LALAGUE..... Mathématiques Générales
M. BOUIGUE ..... Astronomie
M. COUCHET..... Physique
M. LEJEUNE..... Chimie
M. LASCOMBES..... Botanique
M. ASSELINEAU.....Chimie Biologique
M. MAURET..... Chimie Systématique
M. AGID..... Physiologie
M. MONTANT..... Cryptogamie
M. GAUTIER..... Physique
M. CRUMEYROLLE..... Mathématiques
M. GOURINARD..... Géologie
M. PULOU..... MInéralogie
M. CAMBOU..... Physique Spatiale
M. MIQUEL..... Chimie
M. LACOSTE..... Electrotechnique
M. THIBAULT..... Mécanique rationnelle & Appliquée
M. MONTEL..... Chimie physique et Electrochimie
M. MASCART..... Mathématiques
M. MEDIONI..... Psychophysiologie
M. THIRRIOT..... Hydrodynamique E.N.S.E.I.H.T.
M. BRENON..... Géologie
M. LAFON..... Calcul différentiel et intégral
M. RAYNAUD P..... Physiologie animale
M. ZALTA..... Chimie biologique
M. SEVELY..... Electrotechnique
M. POMMIEZ..... Mathématiques
M. REY..... Biologie Végétale
M. COULOMB..... Physique
M. TRINQUIER..... Physique
M. MARONI..... Chimie
M. BEETSCHEN..... Biologie Générale
M. GRUAT..... Mécanique des Fluides (hydraulique).
M. DERACHE..... Physiologie Animale.

PROFESSEURS ASSOCIES.

M. SAKUMA.

Digitized by the Internet Archive
in 2026

https://archive.org/details/IA41543907_0033

PROFESSEURS SANS CHAIRE

M. HAMANT..... Botanique
Mme BRUNEL..... Physiologie Végétale
Melle BERDUCOU..... Physiologie Végétale
M. PICCA..... Physique
M. MERIC..... Mathématiques Appliquées
Mme LEGAL..... Zoologie
M. BUGAREL..... Génie Chimique
M. MIROUSE..... Géologie
M. PILOD..... Physique
M. LARROQUE..... Physique
M. BARRANS..... Chimie
Mme LAFON..... Mathématiques
Mlle LAPEYRE..... Mathématiques - Informatique
M. DAT..... Mécanique des fluides
M. JEANNIN..... Chimie Minérale
M. BERTRAND..... Chimie
M. SATGE..... Chimie Organique
M. DESQ..... Mathématiques
M. MAHENC..... Chimie
M. LATTES..... Chimie
M. ROCARD..... Electronique
M. DEGEILH..... Physique
M. FALLOT..... Biologie Végétale(Viticulture et Arboriculture).
M. POILBLANC..... Chimie
M. TOUZE..... Physiologie Végétale
M. FRASNAY.....Mathématiques
M. CASSAGNAU..... Zoologie
M. GUERIN..... Mathématiques

MAITRES DE CONFERENCES

M. BLANCHARD..... Mathématiques
M. HOFFMANN..... Electronique
M. BITSCH..... Zoologie
M. FONTAN..... Physique Nucléaire
M. PESCIA..... Physique
M. SICARD..... Biologie Génétique
M. CAUSSINUS..... Mathématiques Appliquées
M. DE LOTH..... Chimie Physique
M. MARTY..... Physique Industrielle
M. BAUDRAS..... Chimie Biologique
M. DURAND Ph..... Physique
M. LEFEUVRE..... Electronique E.N.S.E.I.H.T.
M. SOUQUET..... Géologie
M. SAPORTE..... Physique
M. ATTEIA..... Mathématiques
M. ENJALBERT..... Chimie
M. IMBERT..... Psychophysiologie
M. SCHNEIDER..... Biologie Cellulaire
M. ANGELINO..... Génie Chimique
M. MARTIN..... Génie Electrique
M. THENOZ..... Génie Civil
M. DABOSI..... E.N.S.C.
M. CALVET..... Mécanique des Fluides (E.N.S.E.I.H.T)

MAITRES DE CONFERENCES (suite)

M. PAGANI.....Physique
M. CUPPENS.....Mathématiques
M. PERENOU.....Informatique
M. REY.....Génie Electrique
M. MATHIEU.....Chimie Analytique
M. TRANNOY.....Physique (E.N.S.E.I.H.T)
M. CASTAGNETTO.....Mathématiques (E.N.S.E.I.H.T)
M. CASTAN.....Informatique
M. GILOT.....Génie Chimique(Institut du Génie Chimique)
M. LANTELME.....Chimie Industrielle
M. CALMON.....Techniques Agricoles
M. TRUCHASSON.....Mécanique
Mlle BARBANCE.....Mathématiques
M. VERDIER.....Physique
M. GILLY.....Génie Mécanique
M. VEDRENNE.....Mesures Physiques
M. BEAUFILS.....Informatique
M. MATHEAU.....Electronique(E.N.S.E.I.H.T)

MAITRES DE CONFERENCES
ASSOCIES

M. PUN.

CHARGES D'ENSEIGNEMENT

M. DARROZES..... Mécanique
M. PRADINES..... Mathématiques
M. BARTHET..... Mathématiques
M. MAUSS..... Attaché de Recherches au C.N.R.S

PERSONNEL DE L'UNIVERSITE AFFECTE A
L'INSTITUT NATIONAL DES SCIENCES APPLIQUEES DE TOULOUSE.

PROFESSEURS

M. ROQUES..... Chimie Industrielle
M. GRATELOUP..... Génie Electrique
M. MASO..... Génie Civil
M. MIRA..... Génie Electrique

PROFESSEURS SANS CHAIRE

M. CASSIGNOL..... Génie Electrique
M. COLLETTE..... Physique

MAITRES DE CONFERENCES

M. FAGET..... physique
M. SCHUTTLER..... Physique
M. LETURCQ..... Génie Electrique
M. SIRIEYS..... Génie Civil
M. DURAND G..... Chimie
M. CARRARA..... Physique

CHARGES D'ENSEIGNEMENT

M. BROUSSEAU..... Physique
M. LACAZE..... Mathématiques

ADMINISTRATION

M. PRINEAU..... Secrétaire Général de l'Université Paul Sabatier.

-=-=-

"Lorsqu'on poursuit ainsi, des années durant, une recherche fondamentale qui se présente à bien des égards elle aussi comme une discipline originale, le moment semble toujours mal venu d'en livrer au public le bilan".

Pierre SCHAEFFER

A V A N T P R O P O S

-=--=-

Le présent travail constitue la synthèse de douze années de travaux consacrés à la métrologie des grandeurs acoustiques. L'essentiel des publications, des brevets, des expériences, des réalisations techniques et des applications industrielles qui en découlent s'y trouve résumé.

La première partie est consacrée à un rappel critique des connaissances actuelles relatives à la perception des objets sonores et du bruit, ces connaissances sont à la base de tous les concepts métrologiques fondamentaux ayant trait à l'appréciation des grandeurs de sensation.

La seconde partie expose et justifie les exigences du compromis métrologique dont il faut provisoirement se satisfaire en particulier en vue du contrôle et de la sauvegarde de l'Environnement acoustique de l'homme.

Enfin la troisième partie est consacrée à l'étude des solutions originales que nous proposons pour rendre plus efficace la mesure des bruits.

Nous avons volontairement résumé cette partie à l'exposé des principes qui ont déjà conduit à des réalisations instrumentales et permis d'effectuer des mesures "in situ", en comparant les résultats ainsi obtenus avec ceux auxquels conduisent les méthodes classiques.

Plusieurs de ces réalisations techniques sont en voie de développement industriel, il ne nous est donc pas possible d'exposer dans le détail les principes originaux de circuits que les règles de la propriété industrielle nous interdisent de publier. Nous pensons que cette absence de détails techniques ne peut nuire à la compréhension des principes exposés.

Nous avons l'agréable devoir d'exprimer ici des remerciements :

à Monsieur le Professeur J. LAGASSE, qui a si souvent manifesté de l'intérêt pour nos travaux et a bien voulu accepter la Présidence de ce Jury de Thèse.

à Monsieur le Professeur M.Y. BERNARD, Conseiller auprès du Délégué Général à la Recherche Scientifique et Technique qui nous a prodigué ses conseils en vue de la présentation de ce travail et nous fait l'honneur de siéger au Jury.

à Monsieur le Professeur F. CAMBOU dont les amicaux encouragements et l'aide efficace ont été précieux pour la préparation de ce travail.

à Monsieur L. CITTI, Directeur du Laboratoire National d'Essais, qui nous avait déjà fait l'honneur d'associer notre Laboratoire aux mesures et contrôles acoustiques effectués sous son autorité. Nous souhaitons que notre gratitude se matérialise par une longue et fructueuse collaboration avec ses services.

à Monsieur J.MATTEI, Directeur du Département Acoustique Vibration aux Etudes et Recherches de l'E.D.F, tout d'abord parce que la seule aide matérielle pour mener à bien ces travaux nous est venue de son Laboratoire, ensuite parce que nous sommes très honorés de la présence dans ce Jury du Représentant Français à la Commission Internationale d'Acoustique.

à Monsieur le Professeur GUILLIEN, qui a toujours manifesté beaucoup d'intérêt notamment pour nos travaux relevant de l'Electronique Médicale et a bien voulu venir de NANCY pour siéger à ce Jury.

Qu'il nous soit permis d'exprimer ici notre reconnaissance à Monsieur le Professeur Pierre DUPIN, l'excellent cours d'Electronique qu'il professait vers les années 1950 a joué pour nous un rôle déterminant dans le choix d'une activité scientifique. En 1959, il nous a accueilli au Laboratoire d'Electronique et de Haute Fréquence de la Faculté des Sciences de Toulouse, grâce à son aide, ses conseils, et aux qualités acquises à son contact, le présent travail a pu être commencé dans un esprit très ouvert que nous souhaitons voir se perpétuer. Nous regrettons beaucoup qu'une santé trop précaire lui interdise de juger un travail qui lui doit beaucoup.

Enfin, sans la collaboration de tous les instants de l'ensemble de l'Equipe Scientifique et Technique du Groupe de Recherche E.B.M, ce travail n'aurait pu être mené à bien dans tous ses prolongements.

Que tous, des plus anciens aux nouveaux venus au Laboratoire trouvent ici l'expression de mon amicale gratitude.

TABLE des MATIERES

-=-=-

Pages

CHAPITRE I. - CONNAISSANCE DE L'ENVIRONNEMENT ACOUSTIQUE - LES OBJETS SONORES ET LEUR PERCEPTION - LE BRUIT.

1.1. *LES DONNEES DE BASE DU PROBLEME METROLOGIQUE....* 7

1.1.1. Situation générale du problème..... 7
1.1.2. Les objets sonores..... 8
1.1.3. Le bruit..... 8
1.1.4. Acoustique physique..... 10
1.1.5. Acoustique physiologique..... 11
1.1.6. Psycho et socio acoustique..... 11
1.1.7. Electronique..... 12
1.1.8. Acquisition et traitement du signal..... 13
1.1.9. Sauvegarde de notre Environnement..... 13

1.2. L'OREILLE ET LA PERCEPTION AUDITIVE..... 14

1.2.1. Anatomie..... 14
1.2.2. Physiologie..... 17
1.2.3. Eléments de réflexion..... 21

1.3. L'OBJET PHYSIQUE ET L'OBJET PERCU..... 23

1.3.1. Méthodologie..... 23
1.3.2. Résultats classiques..... 24
1.3.3. Résultats récents et paradoxes..... 26
1.3.4. Aspect informationnel du bruit..... 29

Pages

CHAPITRE II. - LE COMPROMIS METROLOGIQUE.

2.1. CONSIDERATIONS METROLOGIQUES GENERALES..... 31

2.1.1. La nécessité des mesures..... 31
2.1.2. L'efficacité des mesures..... 32

2.2. METROLOGIE DES GRANDEURS DE PERCEPTION..... 32

2.2.1. Mesure et sensation..... 32
2.2.2. Normalisation et évolution..... 34

2.3. UNITES ET METHODES EN MESURE ACOUSTIQUE..... 36

2.3.1. Mesure de l'énergie..... 36
2.3.2. Mesure de la sensation..... 37
2.3.3. Mesure de la gêne..... 37
2.3.4. Mesure de la nuisance à long terme... 39

CHAPITRE III. - QUELQUES SOLUTIONS ORIGINALES AUX PROBLEMES METROLOGIQUES.

3.1. RAPPEL CRITIQUE DES SOLUTIONS CLASSIQUES.... 42

3.1.1. Les sonomètres..... 42
3.1.2. Les analyseurs de spectre en temps réel..... 44

3.2. SOLUTIONS AU PROBLEME DES FILTRES DE MESURE. 46

3.2.1. Filtres de"sensation"..... 46
3.2.2. Filtres de"nuisance"..... 47
3.2.3. Perspectives et intérêt..... 52

Pages

3.3. SOLUTIONS AU PROBLEME DE LA DYNAMIQUE..... 62

3.3.1. Les exigences de dynamique..... 62
3.3.2. Solution analogique..... 64
3.3.3. Solution numérique..... 67

3.4. SOLUTIONS AU PROBLEME DE LA PRESENTATION DES RESULTATS..... 70

3.4.1. L'indication analogique linéaire en décibels..... 70
3.4.2. L'indication numérique..... 71
3.4.3. La présentation des résultats à long terme..... 72

3.5. VERS UNE NOUVELLE METROLOGIE..... 77

3.5.1. Exigences fonctionnelles du contrôle de l'Environnement..... 77
3.5.2. Exemple d'acquisition d'une grandeur de type pouveau..... 78

CONCLUSION. 82

-=-=-=-=-

C H A P I T R E I

-=-=-=-=-=-

CONNAISSANCE DE L'ENVIRONNEMENT ACOUSTIQUE
LES OBJETS SONORES ET LEUR PERCEPTION - LE BRUIT

-=-=-=-=-=-

1.1. *LES DONNEES DE BASE DU PROBLEME METROLOGIQUE.*

1.1.1. *Situation générale du problème.*

1°) Les phénomènes acoustiques constituent un des éléments les plus importants de notre "Environnement". Pour l'homme moderne vivant au sein d'une civilisation hautement industrialisée, ces phénomènes acoustiques sont à la fois porteurs de messages et générateurs de "nuisances" dont la nocivité est depuis longtemps parfaitement ressentie. Générateurs de signaux acoustiques de toutes sortes et sources de bruit n'ont cessé au fil des années d'augmenter en nombre, en diversité et en puissance ; paradoxalement l'acoustique - partie de la physique qui étudie les sons (Larousse) - n'a pas suivi dans notre pays cette évolution et, si quelques rares Laboratoires Scientifiques y consacrent une partie de leur activité, on peut constater que l'Enseignement de la discipline est pratiquement inexistant, tant au niveau Secondaire que Supérieur.

Nous verrons dans ce qui suit, que l'Acoustique moderne présente un caractère indéniablement pluridisciplinaire, peut être est-ce là une difficulté qui n'a pas encore été surmontée, ni au niveau de l'Enseignement, ni à celui de la Recherche. Il est donc indispensable - surtout sans doute pour le métrologiste - de cerner aussi bien que faire se peut, les données multiples du problème avant d'aborder quelque tentative de solution.

1.1.2. Les objets sonores.

C'est avec HELMHOLTZ, vers les années 1860, que commencent les tentatives de description purement physique des objets sonores. Il est bon de remarquer que bien avant lui toutefois, les musiciens dans le cadre restreint de l'étude des objets musicaux, avaient remarquablement appréhendé le problème, tant en fabricant et en utilisant des générateurs d'objets sonores bien caractérisés qu'en trouvant par la notation musicale une première méthode univoque pour fixer à l'aide d'un graphisme, la disposition temporelle de ces objets sonores.

A l'issue des travaux d'HELMHOLTZ, s'installe chez les physiciens l'idée qu'un son est défini par son intensité, sa hauteur, son timbre : tout ce qui n'est pas un son ainsi défini, est un bruit. Il faudra des années pour échapper à ces concepts aussi sommaires que tyranniques. Nous verrons dans ce qui suit combien ces notions encore enseignées dans les classes Terminales des Lycées sont fragiles et incomplètes.

1.1.3. Le bruit.

Il faudra attendre 1956 pour trouver dans le vocabulaire d'Acoustique du Comité Electrotechnique Français, une définition du bruit satisfaisante et réaliste :

- Toute sensation auditive désagréable ou gênante.
- Tout phénomène acoustique produisant cette sensation.
- Son ayant généralement un caractère aléatoire qui n'a pas de composants définis.

C'est maintenant à la norme Française N.F.S 30.001 que l'on fait généralement appel, le bruit y est ainsi défini :

-"Phénomène acoustique produisant une sensation auditive considérée comme désagréable ou gênante" -

Cette excellente définition trace la voie au métrologiste, elle implique que toute mesure de bruit devra comporter :

- Une mesure physique relative au phénomène acoustique générateur de bruit.
- Une estimation de la sensation auditive qui en résulte.
- Une estimation de la gêne ou du caractère désagréable découlant de cette sensation.

Si chacune de ces indispensables étapes de la mesure d'un bruit peut être franchie séparément - ce qui est souvent encore le cas - il est certain que l'obtention immédiate du résultat de ces démarches semble le but à atteindre en vue de l'efficacité des mesures. Nous essayerons d'éclaircir plus loin cette dernière notion.

Il n'est donc pas surprenant que les techniques de l'Electronique puis de l'Informatique aient pris dans la

mesure des bruits une place extrêmement importante. Acoustique physique, acoustique physiologique, psycho et socio acoustique, électronique, acquisition et traitement du signal, sauvegarde et amélioration de l'Environnement de l'homme, sont donc indissociables dans l'esprit du métrologiste.

L'originalité de nos travaux ne saurait, certes s'étendre à chacun de ces domaines. Peut-être pouvons-nous très rapidement ici, situer nos préoccupations actuelles et nos intentions plus lointaines en matière de Recherche.

1.1.4. Acoustique physique.

Nous n'avons pas jusqu'à maintenant exploré ce domaine qui se rattache à la mécanique, toutefois, il a fallu tenir compte des connaissances admises en la matière pour faire évoluer nos concepts métrologiques. Il faut noter au passage que de nombreux phénomènes restent à étudier sur le plan de la physique pure. En effet, si les lois de la propagation et de l'absorption de l'énergie acoustique sont depuis longtemps connues et formulées, elles ne s'appliquent généralement pas dans les cas concrets où le calcul théorique présenterait quelque intérêt.

Des travaux menés en collaboration avec la Société Nationale Aérospatiale (ref 1), nous ont montré que les lois de l'absorption athmosphérique n'étaient connues que de façon empirique à travers des abaques élaborés par des constructeurs d'avions, de même on ne sait comment prendre en compte dans le calcul des prévisions de bruit d'aéronefs les effets de sol dont l'importance est loin d'être négligeable.

En ce qui concerne les bruits de circulation urbaine, les lois de propagation échappent encore à toute formulation théorique ou empirique.

Fait plus grave encore, force est d'admettre qu'on ne connait pas à l'heure actuelle de méthode d'étalonnage absolu des microphones en champ libre, ce qui rend bien illusoire le dixième de décibel affiché toutes les 0,5 secondes dans les ensembles complexes de mesure des bruits aéronautiques.

C'est dire combien il est souhaitable que soient entrepris dans ce sens des travaux dont le résultat serait propre à modifier certains concepts actuels scientifiques, techniques et technologiques.

1.1.5. Acoustique physiologique.

Nous tenterons plus loin de faire le point actuel des connaissances admises dans ce domaine. Certains travaux originaux menés au Laboratoire il y a maintenant plusieurs années (ref 2) nous laissent penser qu'ici encore, nos connaissances sont certainement très incomplètes. Si l'on veut bien admettre que la mesure des sensations auditives se présente en fait comme une simulation - au sens cybernétique du terme - du mécanisme de l'audition, on ne saurait trop souhaiter que physiologistes et électroniciens abordent en commun les nombreux problèmes qui se posent encore.

1.1.6. Psycho et socio acoustique.

Il n'est pas possible pour le métrologiste d'ignorer cet aspect de l'Environnement acoustique. Faute d'avoir pu encore réunir autour de nous des spécialistes de ces disciplines humaines, il ne nous a pas été possible de prospecter cette voie de Recherche. Toutes les unités employées pour caractériser les bruits ont une origine subjective statistique.

Il y a une vingtaine d'années, un niveau sonore de 90 dB était réputé atteindre, voire dépasser le "seuil de la douleur". Aujourd'hui, des niveaux supérieurs à 100 dB sont

courants, dans des Etablissements consacrés à la détente et à la distraction. Cette observation lapidaire montre l'importance du conditionnement socio-psychologique dans l'appréciation du confort ou de la gêne acoustiques.

L'étude sociologique débouche inévitablement sur l'étude juridique, et dans ce sens, nous avons récemment ouvert un nouvel axe de Recherche (ref 3) en collaboration avec des chercheurs de formation juridique. Il est tout à fait probable que le résultat de tels travaux conduise à long terme, à de nouveaux éléments de législation, à de nouvelles normes, donc à une nouvelle instrumentation en vue de l'appréciation et du contrôle de notre Environnement.

1.1.7. Electronique.

La métrologie des grandeurs acoustiques d'Environnement n'est actuellement possible que grâce aux méthodes et aux techniques de l'électronique. C'est essentiellement dans ce domaine que nous avons travaillé. Les difficultés que l'on rencontre dans ce qu'il est convenu d'appeler le spectre des "basses fréquences" sont généralement sous estimées. Les nécessités du compromis métrologique que nous exposerons par la suite permettront de mieux situer les exigences sévères qui se présentent au niveau de la conception des circuits. De surcroît, l'information scientifique, technique et technologique est rare et circule mal dans ce secteur particulier de l'électronique.

Pour s'en persuader, il suffit de constater qu'aucune équipe scientifique universitaire française ne travaille dans ce domaine métrologique; sur le plan international, il n'existe pratiquement que trois ou quatre constructeurs capables de mettre sur le marché mondial des équipements de mesure acoustique répondant bien aux exigences modernes en matière de contrôle du bruit.

1.1.8. *Acquisition et traitement du signal.*

Si la conception et la réalisation d'instruments de mesure n'est pas toujours chose aisée, l'exploitation de ces mesures nécessite en général un traitement convenable.

L'informatique certes, peut prendre en charge une telle opération. De nombreux exemples nous ont persuadé qu'en opérant ainsi, on ne gagnait ni en efficacité, ni en compréhension de certains problèmes de "nuisance".

Il nous a paru utile donc, de prolonger nos travaux sur l'instrumentation par des recherches visant à optimiser le traitement des données métrologiques en vue de leur exploitation. Les premiers résultats positifs de cette étude seront présentés ici (ref 4).

1.1.9. *Sauvegarde de notre Environnement.*

Le contrôle de notre Environnement acoustique, la formulation des exigences humaines en termes quantitatifs, la sauvegarde de l'univers sonore qui est plus précieux qu'on ne l'imagine, constituent "in fine", l'objectif de nos travaux.

Parallèlement à nos travaux de Laboratoire, nous n'avons cessé de pratiquer "in situ" des mesures d'Environnement acoustique, en utilisant selon le cas, des instruments traditionnels ou des techniques originales développées en grande partie pour faire face à des exigences concrètes. Ce faisant, nous pensons avoir modestement contribué à la lutte contre le bruit. Ce problème a pris en quelques années une dimension telle, que méthodes et techniques doivent être systématiquement revues. Nous envisageons donc pour les années à venir la mise en oeuvre des méthodes ici proposées dans un cadre beaucoup plus large que celui de nos interventions actuelles.

C'est en pensant à la surveillance acoustique des agglomérations, au contrôle des bruits de trafic aérien, à la médecine du travail, que nous avons conçu et expérimenté de nouveaux instruments. Plusieurs années seront nécessaires pour juger au vu des résultats obtenus dans la lutte entreprise contre les nuisances de l'éventuel bien fondé de nos conceptions.

1.2. *L'OREILLE ET LA PERCEPTION AUDITIVE.*

1.2.1. *Anatomie.*

La connaissance anatomique de l'oreille présente"a priori" peu d'intérêt pour l'électronicien. Il est en effet hors de question d'utiliser pour la simulation, ce modèle d'apparence toute mécanique. Toutefois, la physiologie qui est extrêmement importante, postule la connaissance anatomique. Traditionnellement, l'anatomie distingue :

- l'oreille externe

Elle comprend le pavillon et le conduit auditif, l'un et l'autre de formes et de dimensions variables et se termine par une membrane tendue fermant le conduit auditif : le tympan, sa surface varie de 50 à 60 mm2.

- l'oreille moyenne

Elle est constituée par la caisse tympanique, cavité de 1 à 2 cm^3 communiquant lors des mouvements de déglutition avec les voies rhinopharyngées. A l'intérieur de la caisse, se trouve la chaine ossiculaire constituée par trois

osselets articulés entre eux : le marteau, l'enclume, et l'étrier. Ils sont maintenus en place par les ligaments de l'enclume et du marteau, les muscles du marteau et de l'étrier, muscles et ligaments sont fortement insérés à la paroi osseuse. A l'opposé du tympan, la fenêtre ovale et la fenêtre ronde de nature membraneuse assurent la séparation avec l'oreille interne. Par sa platine, l'étrier est solidaire de la fenêtre ovale. fig (1).

- l'oreille interne

Cet organe "labyrinthique" profondément logé dans l'os temporal, présente une structure beaucoup plus complexe que l'oreille moyenne. Il présente également la particularité de ne pas contenir d'air, deux liquides, l'endolymphe et la périlymphe n'ayant aucune communication entre eux, remplissent totalement les conduits de la cavité.

deux organes assurant des fonctions distinctes garnissent cette cavité.

- l'organe vestibulaire

Constitué par les canaux semi-circulaires, l'utricule et le saccule, il assure les fonctions de l'équilibration. Il est innervé par le nerf vestibulaire.

- la cochlée

ou limaçon, est l'organe de l'audition. Cet organe d'une longueur de 3,5cm se présente sous forme d'une spirale de deux tours et demi. Supportée par une mince lame osseuse appelée lame spirale, la cochlée est divisée longitudinalement en trois canaux parallèles séparés entre eux par deux membranes : la membrane basilaire et la membrane de Reissner.

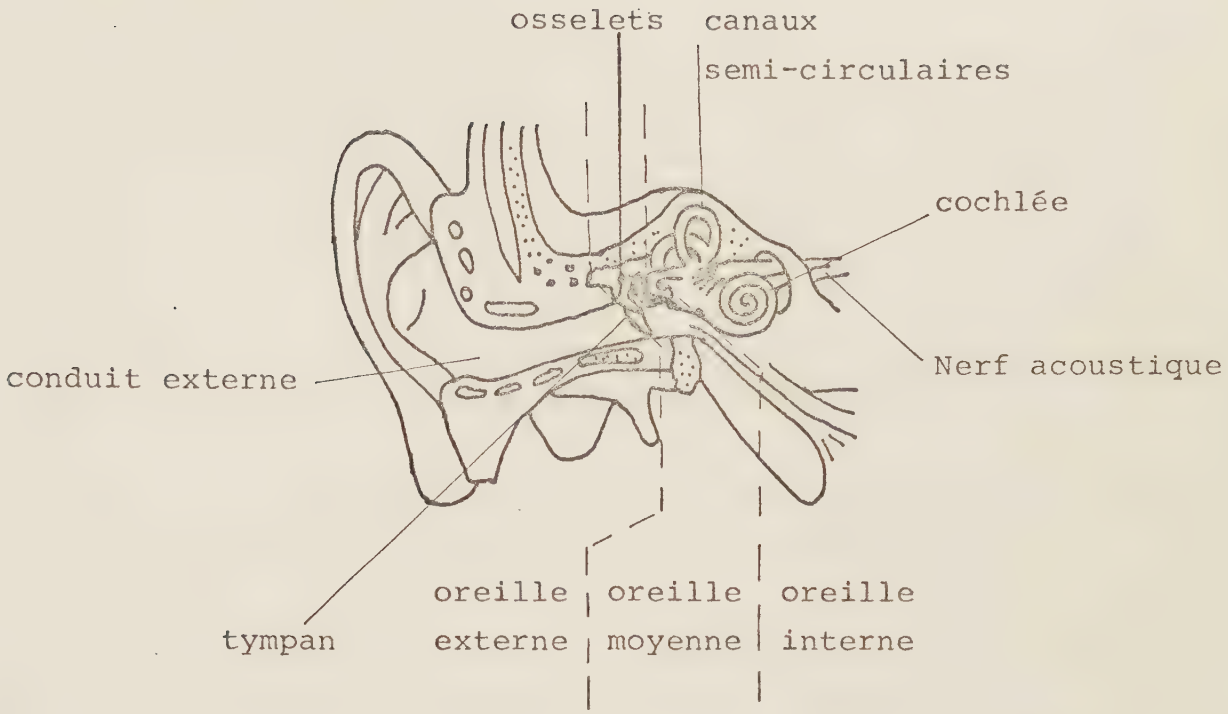


Fig.1 - Coupe de l'oreille

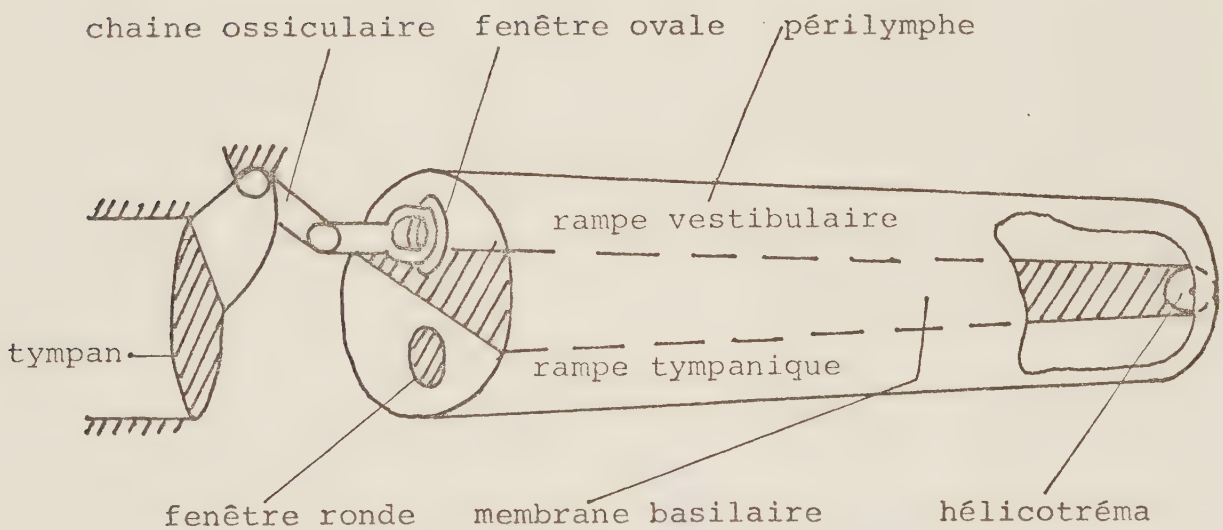


Fig. 2. Schéma de l'organe de l'audition d'après ROEDERER

Ces membranes se rejoignant avant l'extrémité de la cochlée, définissent une cavité allongée et close : la rampe cochléaire. Cette dernière est remplie d'endolymphe. Les deux autres rampes ainsi délimitées se rejoignent au sommet de la cochlée et communiquent au niveau de l'hélicotréma. Le liquide commun qui les garnit est la périlymphe. La rampe supérieure est appelée la rampe vestibulaire et prend naissance à la base du saccule, au niveau de la fenêtre ovale.

La rampe inférieure appelée rampe tympanique, prend naissance au niveau de la fenêtre ronde.(fig 2)

Sur la surface de la membrane basilaire, du côté de la rampe cochléaire, on trouve l'organe de Corti qui est constitué de cellules réparties en plusieurs rangées parallèles. Leur nombre est voisin de 25.000 et leur diamètre ne dépasse pas quelques microns.

A la base de chaque cellule, on trouve une terminaison nerveuse du nerf cochléaire. Ce nerf prend donc naissance dans la cochlée par l'intermédiaire d'un relais, le ganglion spiral. On retrouve l'autre extrémité de ce nerf auditif au niveau cortical de l'aire temporale. Toutefois, il faut noter sur son trajet un inextricable réseau de relais dont l'anatomie exacte est difficile a établir. A titre indicatif, pour un neurone existant au niveau de l'organe de Corti, on estime à 240 le nombre de neurones correspondants sur le cortex. (ref 5).

1.2.2. Physiologie.

On attribue à chaque partie de l'oreille des fonctions particulières à travers une interprétation mécanique

qui est sans doute souvent assez grossière. Nous nous garderons dans ce qui suit, d'entamer une critique raisonnée des idées actuelles en la matière, tout au plus livrerons-nous au passage quelques observations nées de nos propres travaux et qui pourront constituer des éléments de réflexion.

- l'oreille externe

On lui attribue le rôle d'adaptateur d'impédance acoustique.(ref 6). Toutefois, sa contribution à la physiologie de l'audition est modeste si l'on rattache le rôle du tympan au mécanisme de l'oreille moyenne.

- l'oreille moyenne

La chaine des osselets constitue la voie normale de transmission des sons de l'oreille externe à l'oreille interne.

On lui attribue quelquefois,à tort,un rôle d'amplificateur, or, aucun gain énergétique ne peut apparaître le long de cette chaine purement passive. Par contre, il est possible d'envisager une adaptation mécanique d'impédance conduisant à une augmentation de pression sur la fenêtre ovale. Cette adaptation conduirait à un meilleur rendement pour la transmission des signaux de pression passant d'un milieu gazeux dans un milieu liquide.

L'oreille moyenne joue sans doute un rôle important de compresseur de dynamique. Rappelons dès maintenant en effet que la sensation n'est pas linéairement reliée au phénomène physique qui la provoque. C'est ce qu'exprime la loi de FECHNER : " La sensation croît comme le logarithme de l'excitation". Cette loi bien connue des physiologistes a d'importantes répercussions en métrologie et en théorie de l'information.

Par le jeu des muscles insérés sur les osselets, les caractéristiques mécaniques de cette chaine de transmission peuvent se modifier.

La désadaptation mécanique augmentant avec le niveau sonore perçu, ce dernier augmente moins vite que le niveau de pression engendré par l'objet sonore entendu.

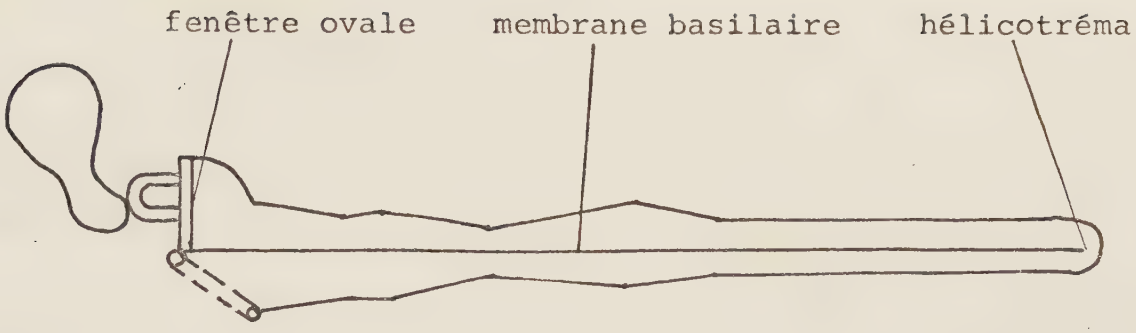
Certaines expériences réalisées "in vivo" sur des animaux possédant une oreille assez semblable à la nôtre, montrent que c'est une augmentation de l'angle d'incidence de l'étrier sur la fenêtre ovale qui, liée à l'augmentation de pression sonore sur le tympan, produit un affaiblissement dans la transmission énergétique de la chaine (ref 7).

Il est intéressant de noter qu'aucune solution de cet ordre n'a jamais été envisagée pour réaliser mécaniquement sur un capteur microphonique, l'anamorphose logarithmique que l'on doit réaliser dans les circuits de mesure.

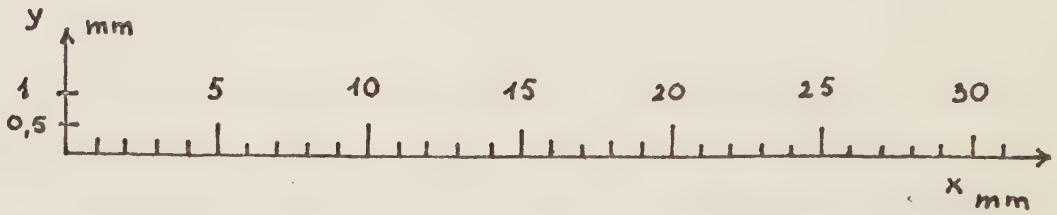
- l'oreille interne

Il a fallu attendre les travaux de VON BEKESY (prix Nobel 1961) pour admettre des hypothèses de fonctionnement qui peuvent se résumer de la façon suivante :

Les déplacements de la fenêtre ovale transmis à un milieu incompressible provoquent une mobilisation des liquides dans l'ensemble rampe vestibulaire - rampe tympanique, mobilisation rendue possible par les déformations de la fenêtre ronde. La membrane basilaire porteuse de l'organe de Corti subirait alors des déformations dont la localisation serait fonction de la fréquence du phénomène excitateur : forme et structure de la cochlée, consistance des liquides interviendraient dans cette analyse fréquentielle : ainsi chaque terminaison du nerf auditif se trouverait électivement excitée dans une zone



a)



b)

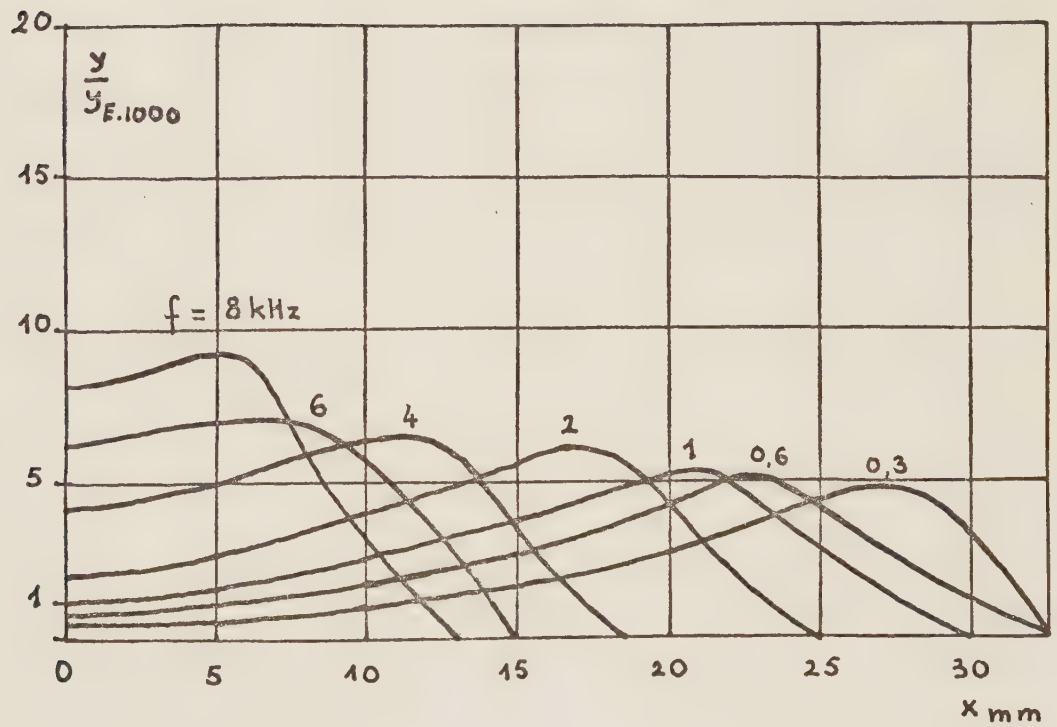


Fig 3

a) limaçon développé
b) vibrations de la membrane basilaire en fonction de la fréquence.

déterminée de fréquences. La membrane basilaire se comporterait donc comme une série de filtres mécaniques, (fig 3 ref 8), filtres à faible coefficient de surtension et se recoupant largement entre eux.

Les neurones corticaux excités après transmission de ce message représentant une analyse spectrale sommaire du signal de pression sonore seraient alors le siège de l'élaboration de la sensation auditive.

Si de telles hypothèses correspondent à la réalité, on peut considérer l'oreille interne comme un ensemble compact réalisant les fonctions décrites sur le schéma de la figure 4.

On notera au passage que toutes ces fonctions sont réalisables par des circuits purement électroniques, ce qui implique que, moyennant le raccordement convenable des sorties codées au nerf auditif, voire au cortex, un nouveau type de prothèse pourrait être envisagé permettant de sortir du silence le sourd profond privé de l'intégrité anatomophysiologique de l'oreille interne.

1.2.3. Eléments de réflexion

En ce qui concerne l'oreille interne, on peut observer :

- que l'exploration électrophysiologique de l'oreille interne est extrêmement ardue, il s'agit en effet d'identifier et de mesurer des "potentiels évoqués" de l'ordre de quelques microvolts aux bornes de microélectrodes d'impédance très élevée et en présence de perturbations mécaniques du milieu.

- que la "spécificité" des quelques 30.000 fibres du nerf auditif n'a pû être clairement établie.

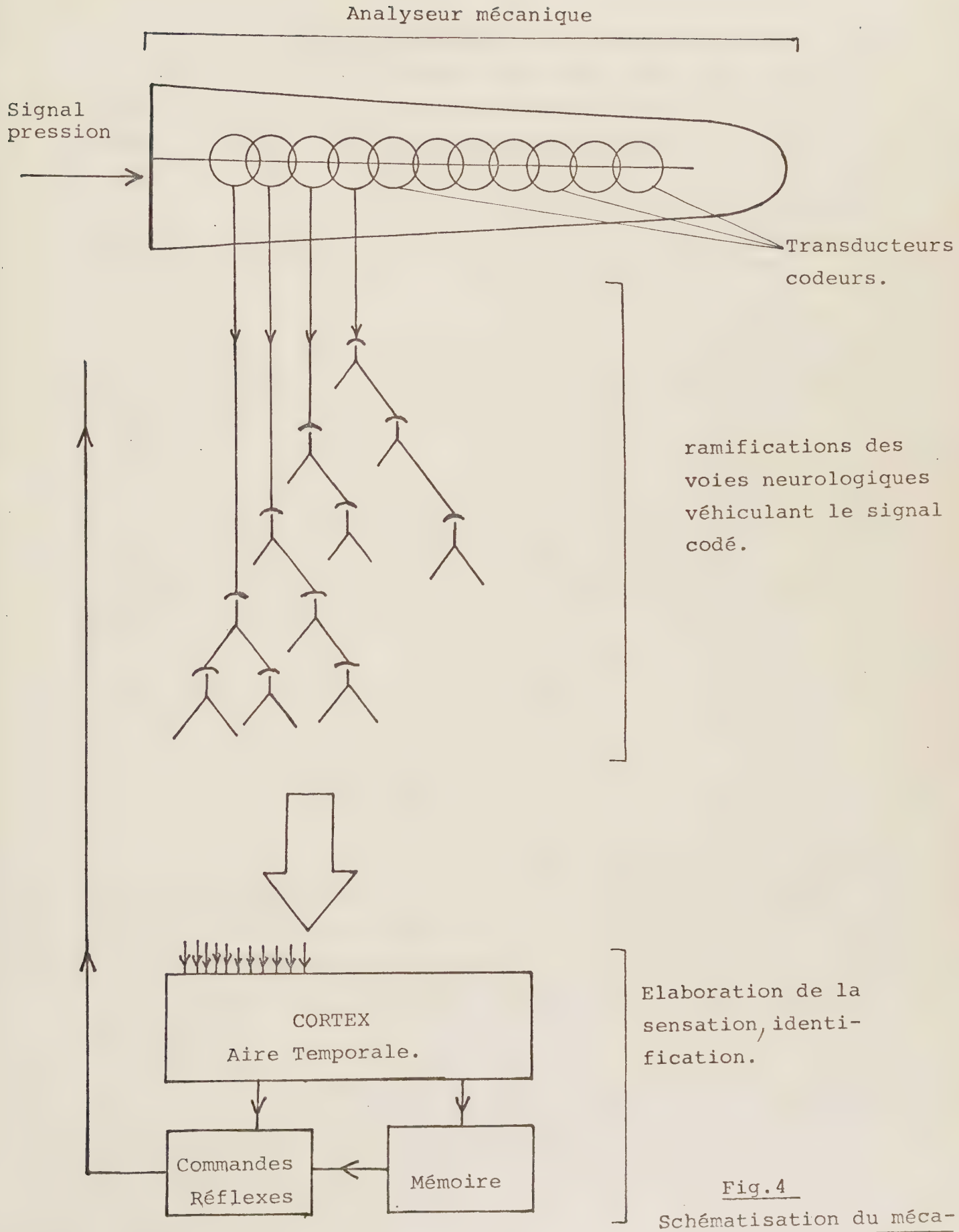


Fig.4
Schématisation du mécanisme de la perception.

- que les fréquences de coupure des voies neurologiques (500 Hz au maximum) sont bien inférieures aux fréquences élevées du spectre sonore, elle rendent indispensable l'existence d'un codage dont on ignore la nature exacte.

- que l'étude analytique postulant l'applicabilité des théorèmes de FOURIER n'est pas forcément la meilleure méthode d'approche de ces problèmes.

- que certains phénomènes que l'on serait en droit d'attendre en pareille hypothèse ne se manifestent pas : distorsion harmonique liée à la saturation du système par exemple.

- que des anamorphoses complexes existent entre l'objet sonore physiquement défini et l'objet sonore perçu, anamorphoses dont on ne sait exactement situer l'origine, expliquer le mécanisme et dont nous allons parler dans ce qui suit.

1.3. L'OBJET PHYSIQUE ET L'OBJET PERCU.

1.3.1. Méthodologie.

En dépit des ses imperfections, on peut admettre que le microphone est un excellent transducteur de pression sonore en grandeur électrique. Sur le signal électrique représentatif du phénomène acoustique, on sait réaliser dans des conditions variables de sensibilité et de précision les opérations suivantes :

- filtrage conduisant à la décomposition spectrale du signal, mesure de l'amplitude du signal en sortie du filtre, mesure de la fréquence, mesure du temps. Il est donc

possible de représenter un objet sonore dans un espace à trois dimensions : amplitude, fréquence, temps. - notons au passage que ces deux dernières dimensions ne sont pas indépendantes - . Il eut été intéressant de comparer pour le même objet l'image physique obtenue par les mesures précédentes et la sensation ressentie, mais il y a bien peu de temps que l'on sait réaliser facilement toutes ces mesures à la fois, aussi l'étude de la sensation a dû initialement être entreprise de façon analytique. Les méthodes utilisées se résument pratiquement à ceci :

- On présente à l'oreille d'un sujet un objet sonore aussi simple que possible, un son pur par exemple de fréquence connue, d'énergie connue : on demande au sujet de comparer la sensation qui en résulte avec celle produite par un objet légèrement différent. Les réponses ainsi obtenues pour de nombreuses expériences réalisées sur un grand nombre de sujets sont statistiquement interprétées et l'on peut relier les variations des dimensions physiques de l'objet avec les variations de la sensation.

1.3.2. Résultats classiques.

- Exploration tonale

Dès les années 1925, FLETCHER et MUNSON ouvrent la voie de cette exploration analytique de la sensation. D'autres chercheurs complètent leurs travaux et des courbes désormais classiques ainsi obtenues (fig 5), on peut déduire :

- que le seuil d'audibilité varie avec la fréquence.
- que pour une fréquence donnée, la sensation n'est pas linéairement reliée au niveau de pression sonore. La loi reliant la sensation au niveau varie avec la fréquence. Ces travaux riches de conséquences ont conduit à deux grandes applications :

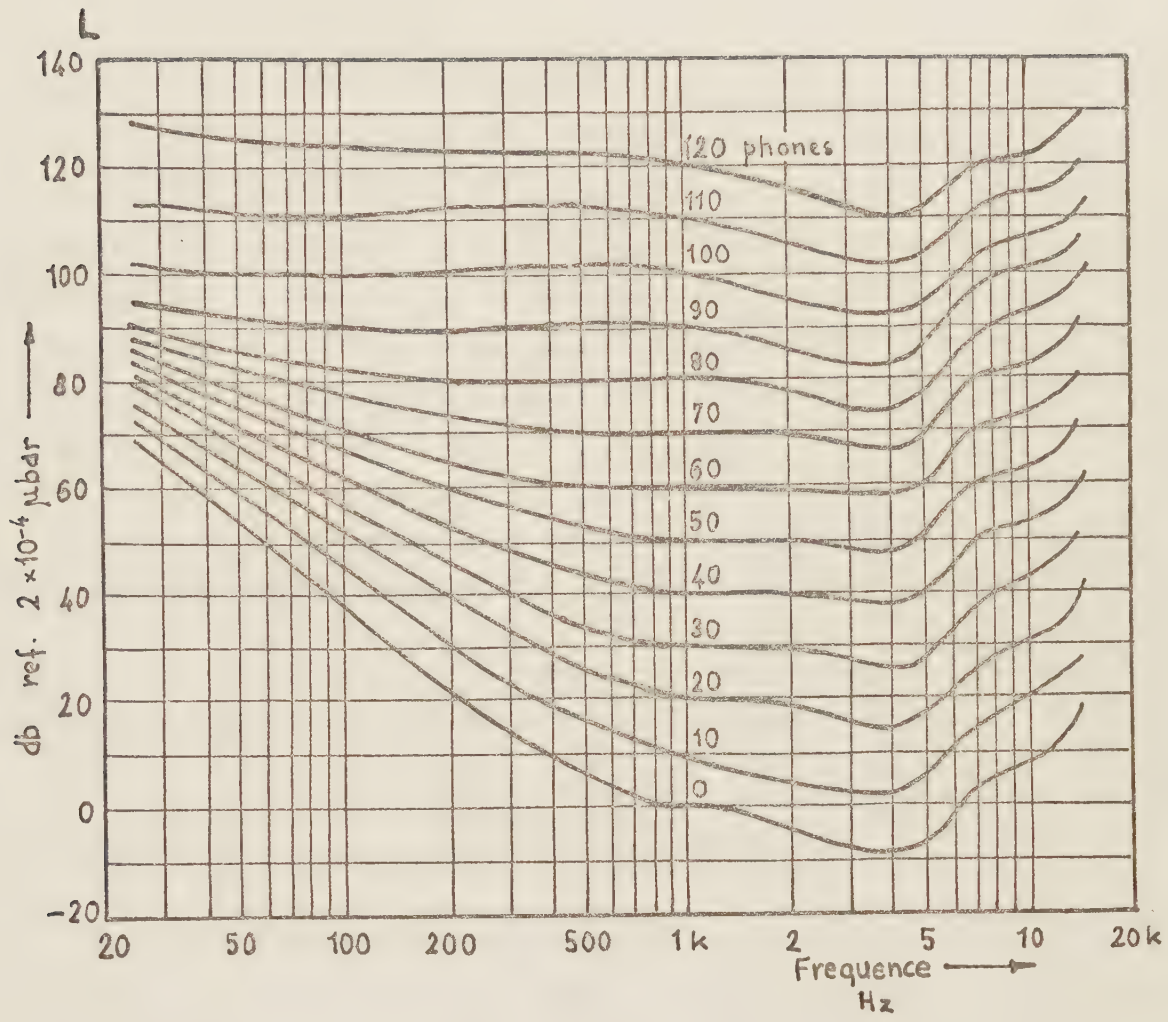


Fig. 5

Courbes de sensibilité de l'oreille

d'après Fletcher et Munson

- l'audiométrie tonale

- la définition des premières unités de mesure de la sensation (phones).

Exploration globale

Il fallut des années pour se rendre compte que la sensation résultant de la perception d'un objet complexe n'était pas la résultante de sensations élémentaires provoquées par chacun des constituants simples de l'objet complexe. Il est intéressant de rappeler que HELMHOLTZ avait déjà exprimé des réserves très pertinentes sur la validité "acoustique" de la décomposition en série de FOURIER.

Une nouvelle approche du problème fut donc tentée en procédant différemment sur le plan méthodologique.

- les sujets sont mis en présence d'objets sonores complexes appartenant à leur environnement.

- une enquête socio-psychologique essaie de situer la réalité de la gêne et de l'inconfort.

Des courbes d'égale gêne peuvent ainsi être tracées et font place à des courbes d'égale sensation, elles postulent toujours une certaine forme d'analyse par l'oreille.

Parallèlement à la définition de nouvelles unités de mesure, cette approche du problème a conduit à l'audiométrie vocale et verbo tonale.

1.3.3. Résultats récents et paradoxes

Effet de masque

L'effet de masque fréquentiel mis en évidence par ZWICKER (fig6) peut se résumer à ceci :

Lors de la perception d'un objet sonore complexe

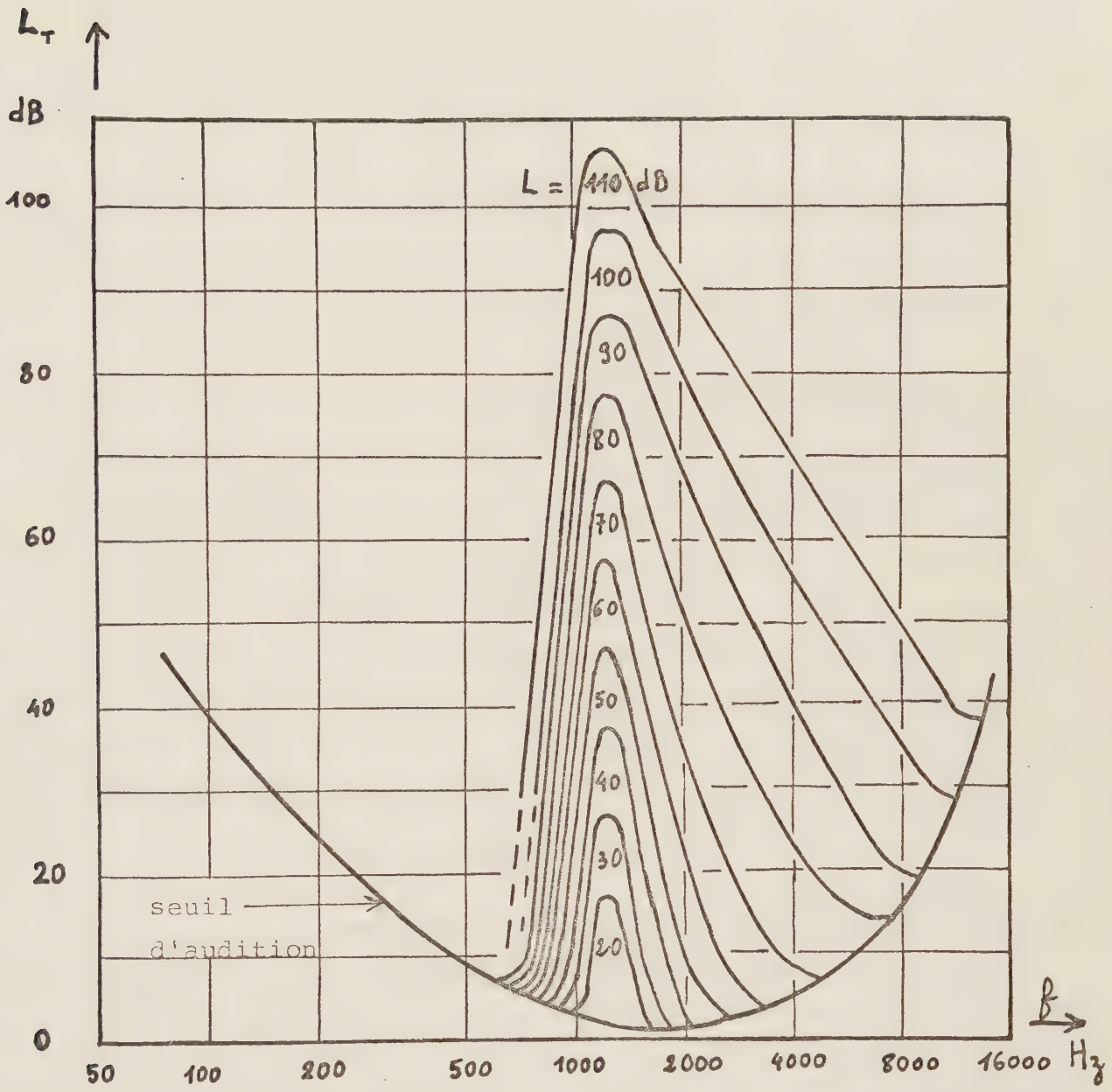


Fig 6

Effet de masque pour un bruit à bande étroite de fréquence centrale 12 00 Hz, le paramètre étant le niveau en valeur efficace de ce bruit.

la présence d'une raie spectrale intense "masque" une partie de l'objet. Par ailleurs, lorsque plusieurs objets sonores d'énergie très différentes se présentent successivement à l'oreille, la sensation n'est pas identique à celle qu'ils provoqueraient, soit présentés de façon isolée, soit présentés dans un ordre différent.

On ne sait pas encore exactement apprécier cet effet de masque temporel.

la relation durée physique, durée perceptive

On doit aux recherches de P. SCHAEFFER (ref9) sur les objets musicaux, des expériences montrant nettement que la durée physique et la durée ressentie peuvent différer dans des proportions très larges, notamment dans le cas d'objets dissymétriques. Il serait extrêmement important d'étendre cette étude de la perception des durées musicales à la perception du bruit. Chacun de nous a ressenti combien la disparition momentanée d'un bruit présentait un caractère reposant. Toutefois, on ne sait pas encore à l'heure actuelle quel coefficient attribuer à ce phénomène dans le calcul de la gêne à long terme.

les paradoxes.

Nous nous contenterons ici de signaler au passage quelques paradoxes bien connus maintenant des spécialistes de la musique en ce qui concerne les relations entre la hauteur perçue et la fréquence. Ils montrent une fois de plus si besoin était, quela réduction des objets sonores à leurs composantes spectrales n'est pas aussi satisfaisante que pourrait le supposer le mathématicien et que de nouvelles voies de recherche doivent s'éloigner de ces concepts fouriéristes de l'acoustique.

La voie de recherche doit donc rester largement ouverte dans le domaine de la perception auditive et certains travaux menés dans la perspective musicale (ref 11) sont riches de

promesses pour une meilleure compréhension de ces phénomènes.

1.3.4. *Aspect informationnel du bruit.*

Les quelques rappels précédents nous éclairent un peu sur la difficulté que l'on rencontre pour relier l'objet physique à la sensation. Nous n'avons pas pourtant jusqu'ici introduit l'élément le plus important qui concerne la signification de l'objet sonore, c'est en fait la difficulté capitale que nous ne pourrons étudier ici. Si l'on pouvait s'en tenir aux concepts simples de la Théorie de l'information, on pourrait admettre que le bruit est constitué par tout ce qui n'est pas le signal, en pareille hypothèse on admettrait qu'en présence d'un objet sonore porteur d'information, tous les autres ne sont que bruit.

Une mesure globale d'énergie de ce bruit pourrait ainsi être significative de la gêne apportée à la perception des signaux utiles. Ce mode d'appréciation effectuée à l'aide des sonomètres traditionnels s'avère rapidement très insuffisant et l'analyse de spectre est maintenant devenue indispensable dans l'appréciation de la nuisance de certains bruits.

C'est dire en fait que ces bruits sont considérés comme signaux, analysés en tant que tels, caractérisés et reconnus au prix de grandes difficultés techniques. Que deviennent alors les notions classiques telles que le rapport signal sur bruit (dans la transmission d'un bruit en vue de sa mesure par exemple).

Par ailleurs, on sait bien qu'à l'aide de la perception auditive et d'un apprentissage convenable, il est possible de percevoir des messages apportés par des signaux acoustiques complètement noyés dans le bruit.

Finalement, on est conduit à conclure que tous les objets sonores sont porteurs d'information et que c'est l'intérêt présenté par cette dernière pour l'auditeur qui fait que tel objet sonore présenté à tel instant est ou non, un altérogène de l'Environnement Acoustique.

Ces dernières considérations seront, on le verra, très importantes, soit pour juger de l'efficacité métrologique des systèmes de mesure de bruit, soit pour en concevoir de nouveaux.

-=-=-=-=-

C H A P I T R E II

-=-=-=-=-

LE COMPROMIS METROLOGIQUE

-=-=-=-=-

2.1. *CONSIDERATIONS METROLOGIQUES GENERALES.*

2.1.1. *La nécessité des mesures.*

Plus un phénomène apparaît complexe, plus le physicien souhaite l'appréhender par l'étude de ses éléments qu'il isole par la pensée d'abord, par la technique ensuite.

Il convient alors d'atteindre quantitativement ces éléments et de faire correspondre un nombre à chacune de ces grandeurs physiques. C'est l'objet de la mesure. A partir de là, il est en général possible d'établir des relations entre les phénomènes physiques et de prévoir ainsi le sens de leur évolution, de même qu'il est possible d'infirmer ou de confirmer telle vision purement théorique de ces phénomènes. Quoiqu'il en soit, la mesure apparait comme la clef de la connaissance scientifique. Notons que cela ne signifie pas qu'elle va favoriser l'esprit d'invention, bien au contraire, et dans le domaine de l'acoustique des inventions telles que la notation musicale ou le phonographe ne doivent rien à la mesure physique des objets sonores, on peut même penser que la connaissance que nous avons maintenant des phénomènes acoustiques aurait conduit à des techniques infiniment plus complexes pour réaliser la conservation des objets sonores.

2.1.2. *L'efficacité des mesures.*

Il nous parait utile de rappeler ici cette notion fondamentale et simple trop souvent oubliée dans le domaine des mesures acoustiques. L'appareil de mesure n'est pas une entité isolée mais constitue un élément indispensable dans une chaine que l'on peut représenter de façon classique par le schéma de la figure (7).

Cette chaine est constituée en vue d'un objectif qui peut être, soit la connaissance des phénomènes mesurés, soit le contrôle de certaines grandeurs évolutives et leur maintien dans des limites fixées à l'avance.

C'est seulement si ces objectifs sont atteints et notamment s'ils le sont de façon simple rapide et économique, que l'on pourra porter un jugement d'efficacité.

Quelques observations (ref 4) sur les mesures normalisées en acoustique aéronautique vues sous l'angle de leur efficacité nous ont conduit à des solutions nouvelles.

2.2. *METROLOGIE DES GRANDEURS DE PERCEPTION.*

2.2.1. *Mesure et sensation.*

Une humanité sourde aurait pu découvrir l'acoustique et en établir des lois à la manière de ce que nous avons fait vis-à-vis du magnétisme Si cette façon d'aborder la discipline peut se justifier dans certains cas (ultra sons, physique du solide), il n'en est pas de même en matière d'Environnement de l'homme où au contraire l'aspect sensoriel l'emporte sur toute autre considération. Tous les instruments de mesure que l'on envisagera de réaliser dans cette perspective devront se présenter d'abord comme des simulateurs de sensation, nous avons dans la première partie de ce mémoire tracé dans ses grandes lignes le contour de nos con-

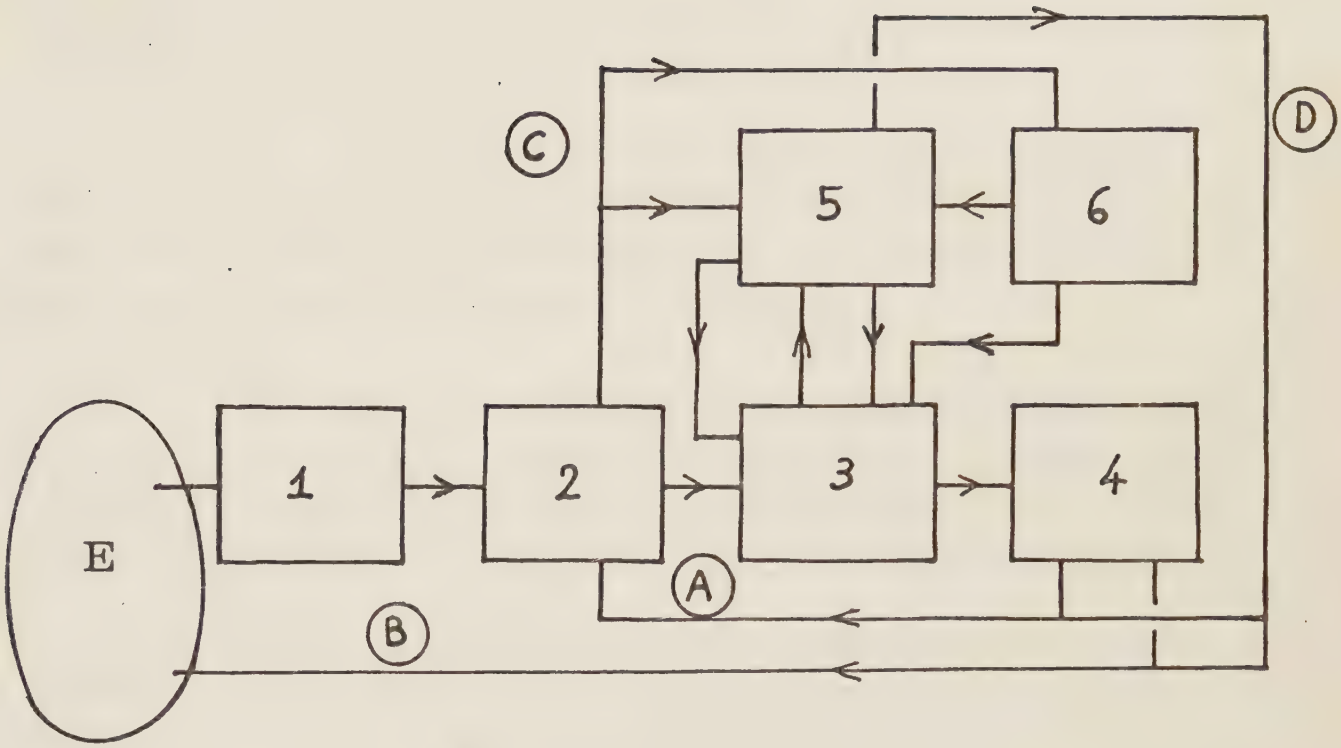


Fig. 7

Cybernétique de la mesure.

1. Capteur ou transducteur qui isole de l'ensemble des grandeurs physiques E, celle que l'on souhaite contrôler.
2. Appareil de mesure.
3. Organe de sensation (oeil de l'opérateur par exemple).
4. Organe de décision et d'action. (peut agir sur l'appareil (A) pour l'adapter aux circonstances de la mesure ou sur le phénomène (B) pour le contrôler).
5. Organe de calcul. (peut intervenir avant la présentation du résultat de la mesure ou en vue de l'aide à la décision)
6. Organe de mémoire. Contient l'ensemble des consignes et accumule une "expérience".

La voie directe D court-circuite l'opérateur humain. Les qualités ou les défauts de l'appareil de mesure 2 ne peuvent être appréciés que dans le contexte de ce diagramme, les qualités intrinsèques de l'instrument de mesure ont peu d'intérêt notamment sur le plan de l'efficacité.

naissances relatives à la perception des objets sonores, on peut en tirer les conclusions provisoires suivantes :

- les lois reliant les phénomènes physiques aux sensations qu'ils provoquent sont complexes, ne répondent pas en général à des modèles mathématiques classiques et restent encore partiellement inconnues.

- vouloir réaliser des appareils de mesure simulant ces lois et donnant des indications avec une grande classe de précision est illusoire, non seulement d'un point de vue technique mais aussi et surtout pour des raisons fondamentales.

- toutes les unités employées ont un caractère subjectif et statistique ce qui peut surprendre le physicien, ce dernier est en effet rarement conscient du fait qu'il en est de même dans tous les domaines métrologiques.

2.2.2. *Normalisation et évolution.*

Devant toutes les difficultés précédemment évoquées, le problème de la normalisation des unités, des méthodes et des instruments de mesure se pose en acoustique avec une acuité toute particulière. En effet, il importe dans le sens de l'efficacité générale des mesures acoustiques de pouvoir comparer des résultats, échanger des connaissances, de tenter de définir des critères d'Environnement. De ce point de vue, la normalisation s'avère indispensable et peut être considérée par ses effets comme génératrice de progrès. A l'opposé, le côté nécessairement figé de son expression présente un aspect indéniablement stérilisant pour l'évolution des concepts et des techniques. (ref.46).

Tout au long de nos travaux, nous nous sommes heurtés dans la conception de nouveaux instruments aux exigences

des Normes internationales. En effet, faute de s'y conformer,

- le résultat des mesures est pratiquement incommunicable

- un appareil non conforme aux Normes en vigueur ne peut prétendre à l'industrialisation.

L'établissement d'une Norme de mesure en matière d'Environnement acoustique présente il faut le reconnaitre, de nombreuses difficultés, il suppose en effet que des commissions internationales se mettent d'accord sur les points suivants :

- telle unité de mesure représente bien la sensation ou la gêne ressenties en présence de tel objet sonore.
- tel type d'instrument présentant des caractéristiques acoustiques et électriques bien définies permet d'effectuer la mesure dans l'unité adoptée.
- tel Environnement acoustique défini à partir des éléments précédents est considéré comme nuisible ou dangereux dans des conditions déterminées.

Lorsqu'un accord intervient sur tous ces points, ce qui n'est pas si simple, les choses se trouvent figées, or l'évolution des sciences et des techniques, l'évolution des conditions de vie, l'évolution sociopsychologique de l'individu se poursuivent. L'évolution des concepts en matière d'acoustique aéronautique au cours des dix dernières années est bien représentatif de ces problèmes : unités et méthodes de mesure n'ont cessé de se compliquer pour atteindre un degré de complexité tel que bien peu de spécialistes peuvent "ex abrupto" donner une définition de l'EPNL (dB), unité normalisée (ref 12) et que l'ordinateur est devenu indispensable pour la mesure.

Bien conscients de ces problèmes, nous n'avons toujours retenu que des solutions susceptibles de s'adapter à de nouvelles exigences métrologiques dans ce domaine extrêmement mouvant.

Toutefois, il faut bien dire qu'une politique réaliste de l'Environnement ne pourra être menée à bien que si l'on tente de simplifier et d'unifier la métrologie actuelle des grandeurs acoustiques, ceci bien sûr au détriment d'une précision par ailleurs illusoire.

Nous ne sommes pas loin de penser que pour les années à venir, il sera plus important de faire admettre ces concepts que de concevoir de nouveaux instruments.

2.3. *UNITES ET METHODES EN METROLOGIE ACOUSTIQUE.*

2.3.1. *Mesure de l'énergie.*

L'énergie acoustique rayonnée par une source sonore est proportionnelle au carré de la variation de pression. On utilise donc un capteur de pression capable de travailler aussi linéairement que possible aux fréquences acoustiques.

Le plus répandu est le microphone à condensateur (ref 13 et 14). C'est sur la tension de sortie que l'on effectuera l'élévation au carré nécessaire pour atteindre l'énergie.

Autant pour tenir compte de la loi de FECHNER que pour bénéficier des commodités de manipulation des nombres offertes par les logarithmes, on retiendra le logarithme du carré de la variation de pression. Enfin pour fixer la référence indispensable dans une représentation logarithmique, on utilisera comme pression de référence celle qui correspond au seuil d'audibilité dans la zone fréquentielle la plus sensible de l'oreille humaine.

Le décibel se trouve ainsi défini par la relation:

$$L = 10 \log_{10} \frac{P_1}{P_o} = 20 \log_{10} \frac{p_1}{p_o} \quad \text{avec}$$

L = Niveau sonore en décibels

P_1= Energie du phénomène mesuré

P_o= Energie correspondante au seuil d'audibilité

p_1= Pression mesurée par le microphone

p_2= Pression de référence = 2.10^{-5} Pascal (ref 15)

La grandeur physique "niveau de pression sonore" mesurée dans cette unité répond aux critères définissant une "grandeur mesurable". Il suffit de quelques expériences pour se rendre compte qu'il s'agit de pur formalisme, une pondération spectrale s'impose rapidement pour tenter une meilleure approche d'une mesure qui soit plus représentative de la sensation.

2.3.2. *Mesure de la sensation.*

L'exploration analytique de la perception auditive ayant conduit au réseau de FLETCHER et MUNSON (ref 16), la première idée a été d'utiliser un réseau de filtres ayant des caractéristiques inverses de celle du réseau précédent. Bien que l'on sache - on le verra plus loin - réaliser actuellement un tel réseau de filtrage, ila été nécessaire de réduire ce réseau complexe à trois courbes normalisées appelées (A), (B), et (C),(ref 17) fig(8), chacune des courbes du réseau s'utilisant dans des conditions parfaitement fixées.

2.3.3. *Mesure de la gêne.*

Au-delà de l'utilisation de ces filtres pondérateurs, la mesure doit faire appel à l'analyse spectrale de l'objet sonore.

Il n'est pas possible ici de faire l'historique des travaux ayant conduit à la normalisation de certaines méthodes. Notons simplement que toutes reposent sur la démarche suivante :

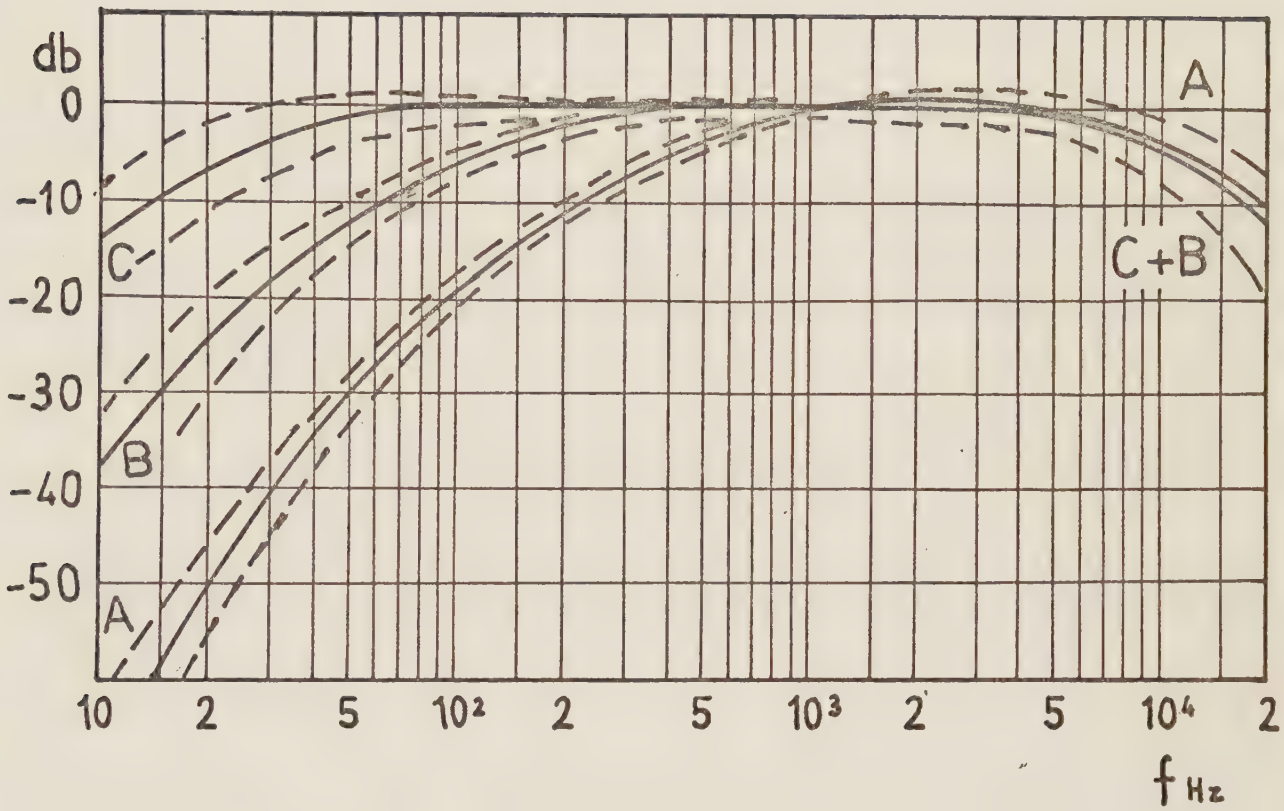


Fig. 8

COURBES NORMALISEES DES SONOMETRES

- le bruit fait l'objet d'une analyse de spectre généralement effectuée à $\frac{\Delta f}{f}$ constant (octave ou tiers d'octave) bien que d'autres critères d'analyse aient été proposés (bark de Zwicker, mel etc.. (ref 19).

- le spectre grossier ainsi obtenu est reporté sur un réseau de courbes d'égale gêne, on retient la courbe qui enveloppe totalement le spectre, elle est caractérisée par un indice.

- après avoir situé sur le réseau de nuisance la raie la plus importante, on fait intervenir l'énergie continue dans les autres bandes d'analyse en l'affectant d'un coefficient.

- la valeur numérique de cet indice peut éventuellement être corrigée en tenant compte, soit de certains phénomènes perceptifs tels l'effet de masque fréquentiel, soit à partir de la prise en compte d'irrégularités spectrales importantes, soit enfin en introduisant un terme lié à l'évolution temporelle du spectre.

On arrive à partir de ces méthodes, à définir de nouvelles unités de mesure de la gêne telles que le "Noise Rating Number" (ref 20), le "Niveau de bruit perçu" PNdB (ref21) l'indice de sonie de ZWICKER, sone G, (ref 22,23) le TPNdB, EPNdB (ref 12).

A ce stade, la mesure devient d'une grande complexité, le méthodogramme de la figure (9) montre comment on atteint le EPNdB, unité de mesure des bruits d'avions, en réalisant une analyse de spectre toutes les 0,5 secondes.

2.3.4. *Mesure de la nuisance à long terme.*

L'effet cumulatif de la gêne dûe au bruit est bien ressenti mais mal connu, il a donc fallu ici aussi trouver des méthodes d'estimation de la gêne cumulée basées sur des études

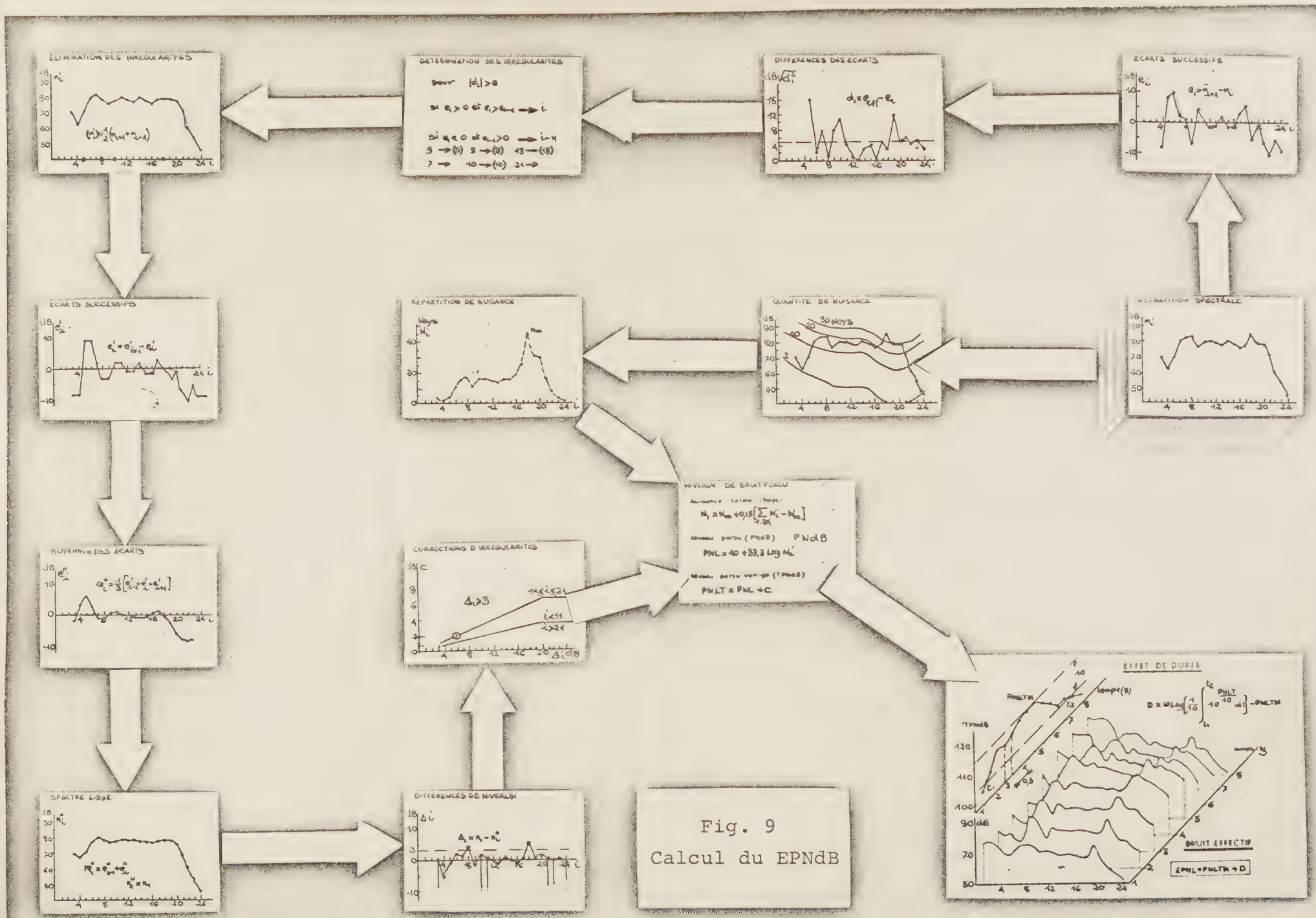


Fig. 9
Calcul du EPNdB

statistiques prenant en compte, et des observations physiques et des résultats d'enquêtes sociopsychologiques.

Toutes ces méthodes utilisent des principes d'intégration des phénomènes physiques mesurés dans les unités précedemment évoquées, toutefois, les critères d'intégration sont variables et en général,complexes.

Ils font l'objet, soit de textes officiels comme le critère WALSH HEALEY aux Etats Unis (ref 24), soit de recommandations du type ISO(Ref 25).

L'obtention d'un indice de nuisance étant extrêmement important dans une perspective de sauvegarde de l'Environnement, il est certain que ces méthodes vont modifier profondément la métrologie acoustique dans les années qui viennent.

-=-=-=-

C H A P I T R E III

-=-=-=-=-

QUELQUES SOLUTIONS ORIGINALES AUX PROBLEMES METROLOGIQUES.

-=-=-=-=-

3.1. RAPPEL CRITIQUE DES SOLUTIONS CLASSIQUES.

3.1.1. Les sonomètres.

Les premiers sonomètres font leur apparition vers les années 1930, les appareils actuels qui ont bénéficié de nombreux perfectionnements techniques et technologiques demeurent inchangés dans leur principe.

L'instrument réalise une simulation de la perception auditive dans le respect des Normes en vigueur (ref 17). La figure 10 représente le principe d'un tel instrument. Très répandu à l'heure actuelle, cet appareil qui a rendu de nombreux services présente toutefois un certain nombre de limitations :

- dynamique de mesure.

Elle n'excède pas 20 dB utiles par calibre en moyenne, la limitation vient surtout du circuit quadrateur qui ne peut assurer convenablement sa fonction sur une dynamique plus grande

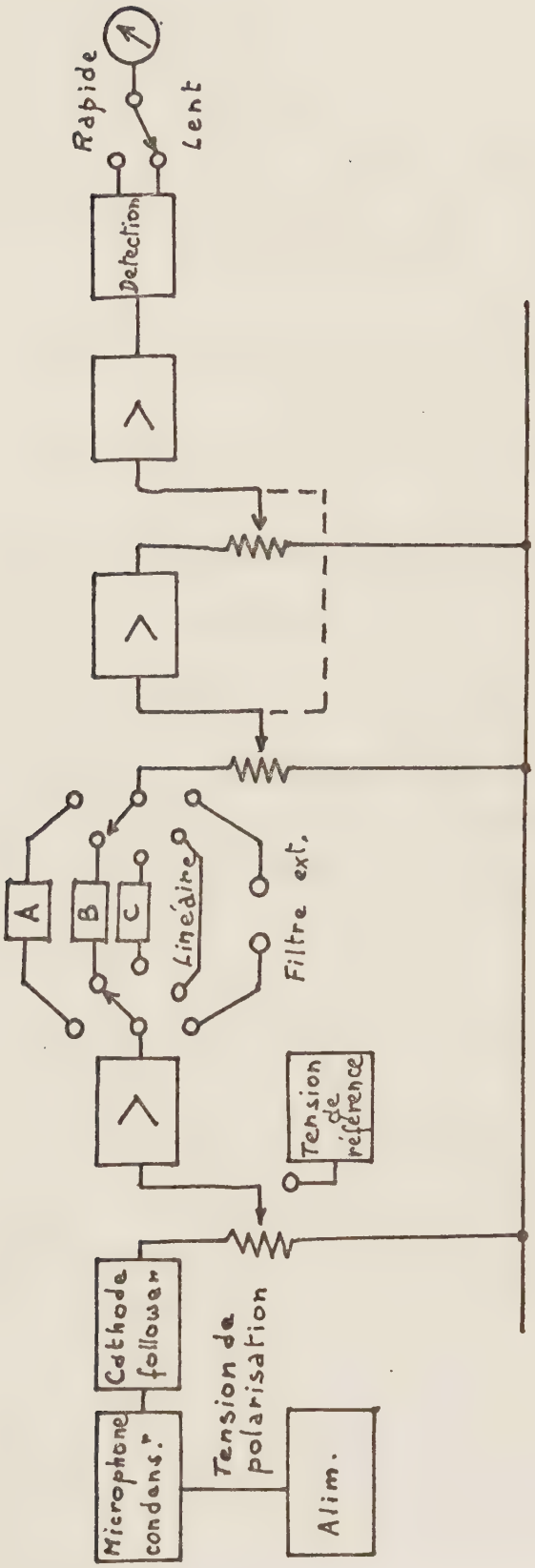


Fig.10

Schéma de principe d'un sonomètre

si l'on veut pouvoir détecter des signaux présentant des facteurs de crête atteignant des valeurs supérieures à 5. Or, de nombreux phénomènes acoustiques se manifestent avec une dynamique plus grande (passage d'un cyclomoteur bruyant par exemple).L'opérateur "perd" l'indication d'autant plus, qu'outre le changement de calibre, il doit en principe assurer une commutation de filtre.

- évolution temporelle du phénomène.

Il est pratiquement impossible de la prendre en compte.

- intégration de la "nuisance".

Elle est impossible.

Les récents perfectionnements apportés à ce type d'appareils : choix de différentes "constantes de temps", mise en mémoire de la valeur maximum, adjonction de filtres d'octave, ne résolvent pas les difficultés fondamentales ci-dessus exposées; en outre l'appareil n'est efficace - dans les limites précédentes - que s'il est aux mains d'un utilisateur expérimenté.

3.1.2. Les analyseurs de spectre en temps réel.

Bien que plusieurs techniques soient possibles pour réaliser à l'aide de circuits électroniques l'analyse spectrale d'un signal (ref 26, 27, 28),les solutions retenues pour les analyseurs de signaux acoustiques procèdent toutes du principe décrit par le bloc diagramme de la fig (11).

Ici encore, les exigences des Normes émises en matière de mesure des bruits d'avions ont guidé la réalisation de l'appareil et les conditions de son exploitation.

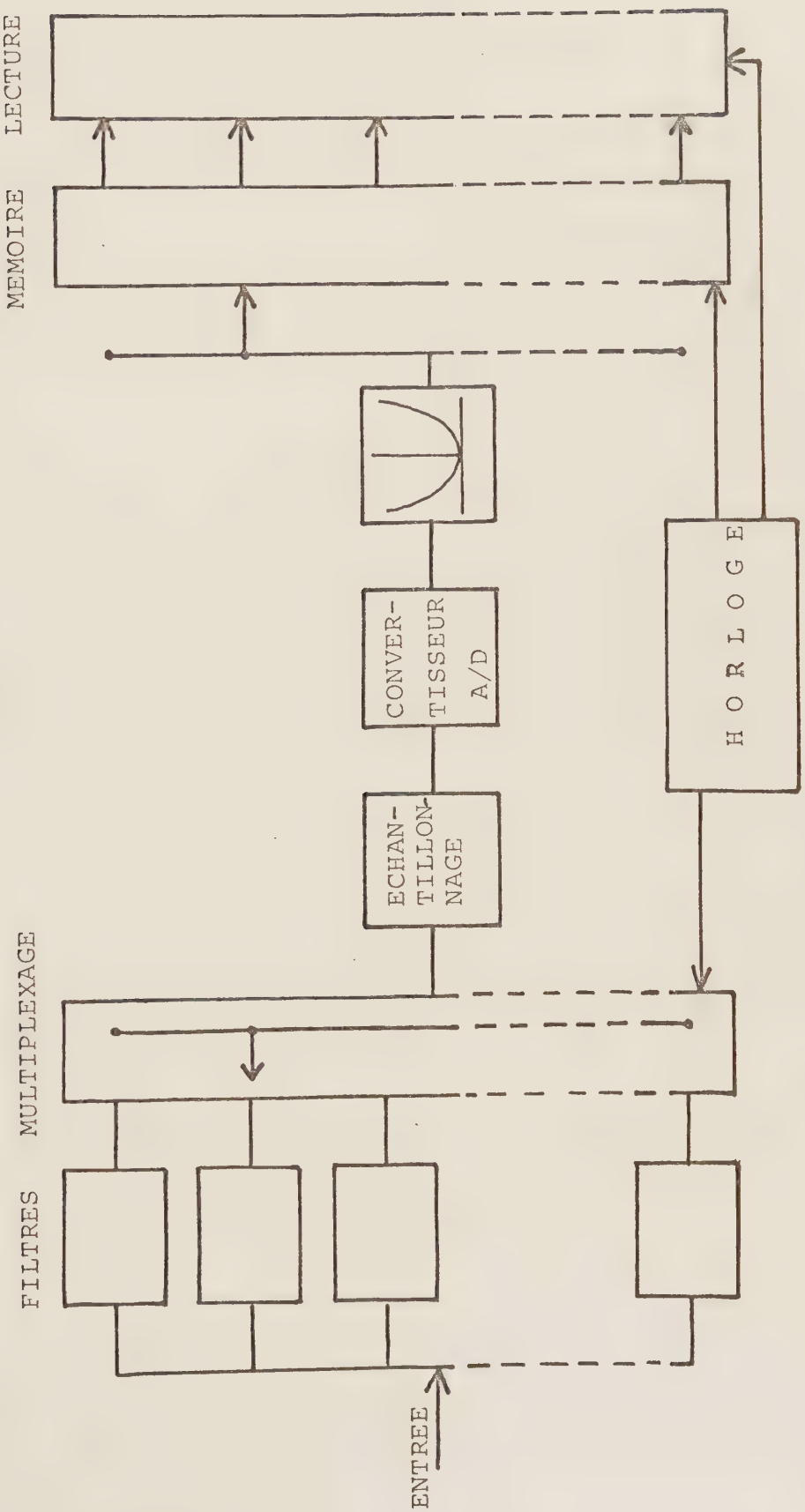


Fig. 11

Bloc diagramme d'un analyseur de Spectre

Limitations de l'appareil.

A priori un tel instrument doit permettre toutes les investigations métrologiques et,relié à un ordinateur, doit pouvoir aussi bien décrire un objet sonore complexe et évolutif qu'estimer la nuisance d'un bruit à partir de critères compliqués et changeants.Toutefois, il faut noter sur le plan de l'efficacité des mesures les inconvénients de tels instruments.

- l'équipement est extrêmement onéreux.

- l'appareil est très difficilement transportable "in situ",de ce fait, il faut lui apporter au Laboratoire l'objet sonore à étudier, les canaux d'information ou les supports utilisés à cet effet lui font perdre de son efficacité, soit par perte d'une partie de l'information, soit en faisant travailler en temps différé un instrument conçu à grand mal pour travailler en temps réel, soit en grévant considérablement le prix de la mesure.

- l'appareil n'est pas auto adaptatif.

En définitive, ces appareils d'un grand intérêt pour les études fondamentales ou les mesures particulières propres à la certification des aéronefs sont très mal adaptés au contrôle permanent de l'Environnement acoustique.

3.2. SOLUTIONS AU PROBLEME DES FILTRES DE MESURE.

3.2.1. Filtres de sensation.

Nos premiers travaux dans ce sens ont été publiés en 1965 (ref 29). L'idée initiale était de réaliser un filtre à gabarit continuement variable, la caractéristique affaiblissement - fréquence étant asservie au niveau sonore mesuré. En supposant :

- que l'on sache faire fonctionner l'ensemble des circuits de mesure sur une grande dynamique.

- que la constante de temps d'adaptation du gabarit soit compatible avec la constante de temps de détection.

Il devient possible de réaliser un appareil de mesure automatique de la sensation sonore prenant en compte le réseau de FLETCHER et MUNSON.

Une telle "oreille artificielle" se présenterait selon le bloc diagramme de la figure(12). On peut envisager la réalisation d'un tel filtre en associant des cellules RC comportant des éléments non linéaires. Notre étude initiale a porté sur une cellule constituée d'une résistance pure et d'une jonction bloquée travaillant en capacité variable (fig 13a) à tension de commande issue de la détection quadratique modifie la valeur de C et sur le montage original, les caractéristiques représentées fig(13b) ont pu être obtenues.

Il est possible d'aller plus loin dans cette voie en utilisant un élément résistif non linéaire (F.E.T.par exemple) et, en associant des cellules passe haut et passe bas, d'obtenir une approximation suffisamment bonne compensant la non linéarité de la perception en fonction de la fréquence. Un tel réseau inséré dans la boucle de réaction d'un amplificateur opérationnel permettrait donc l'interpolation continue entre les filtres A, B et C normalisés.

On discutera plus loin l'intérêt métrologique d'une telle technique.

3.2.2. *Filtres de nuisance.*

Plus récemment entreprise au Laboratoire, l'étude d'un filtre de nuisance s'est montrée nécessaire pour simplifier le problème de la mesure des bruits d'avions.

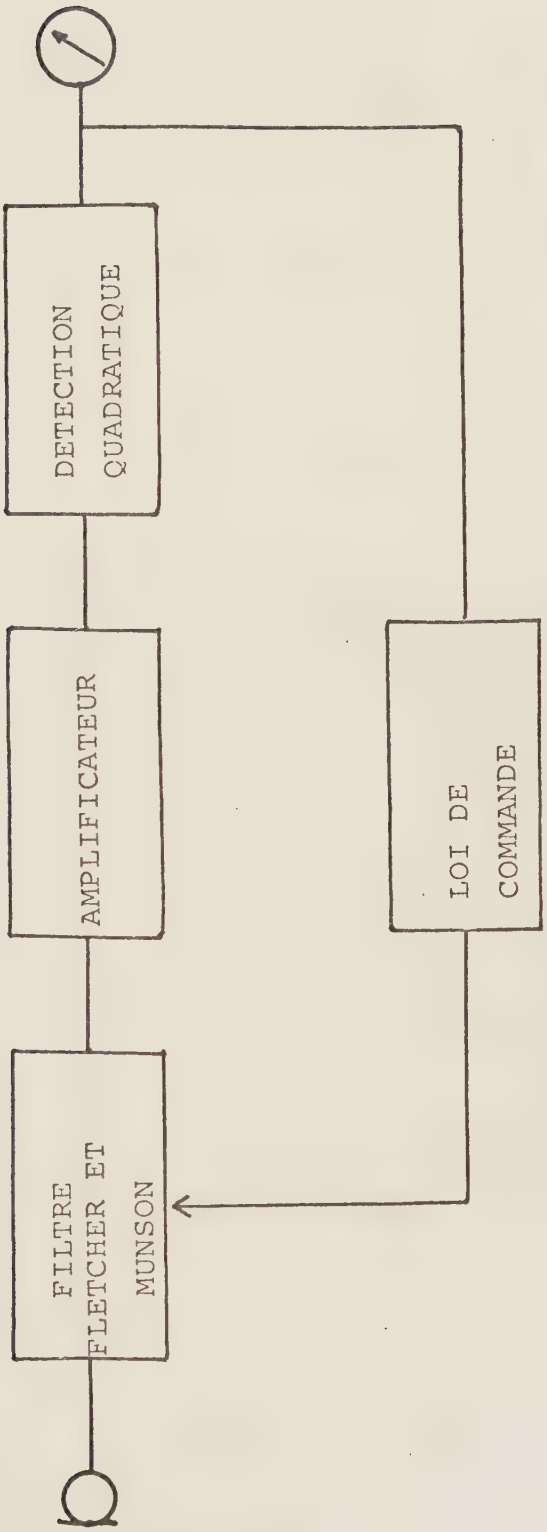
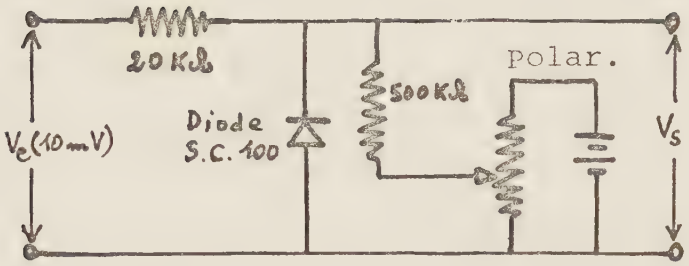


Fig. 12

FILTRES AUTOADAPTATIFS

BLOC DIAGRAMME

a)



b)

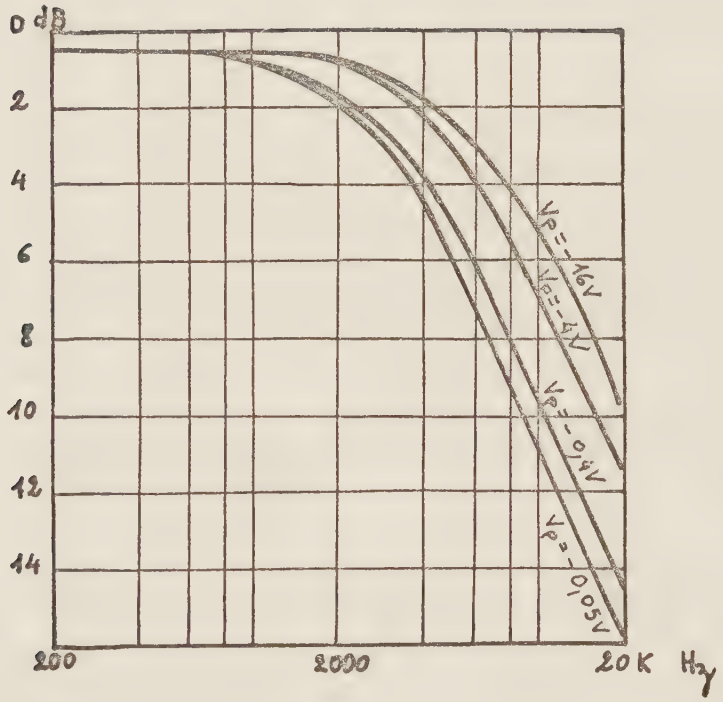


Fig.13

a) Filtre autoadaptatif

b) Variation de la courbe de réponse avec la tension appliquée.

Elle a été motivée par les considérations suivantes :

- l'unité de mesure PNdB fait appel à l'analyse de spectre et à un réseau normalisé de courbes d'égale gêne (fig.14).

- les bruits d'avions dans les configurations de vols bruyants (décollage, atterrissage, survol à basse altitude) ne présentent pas - en tant qu'objets sonores - des dimensions extrêmement variables de l'un à l'autre.

- la précision affichée des mesures classiques est illusoire (micros, effets de sol, etc..)

Il est donc possible d'envisager une simplification de la méthode conduisant au même résultat, pour atteindre un tel objectif, il faut pouvoir :

- définir le gabarit optimal de filtre à utiliser (ref 30).

- définir le "calage" en niveau du gabarit.

- réaliser les circuits correspondants en ménageant de bonnes possibilités d'adaptation en prévision soit d'une modification possible des tables de Noys, soit de la prise en compte de spectres de bruit d'allure nouvelle. (Concorde par exemple).

L'étude a été menée de la façon suivante :

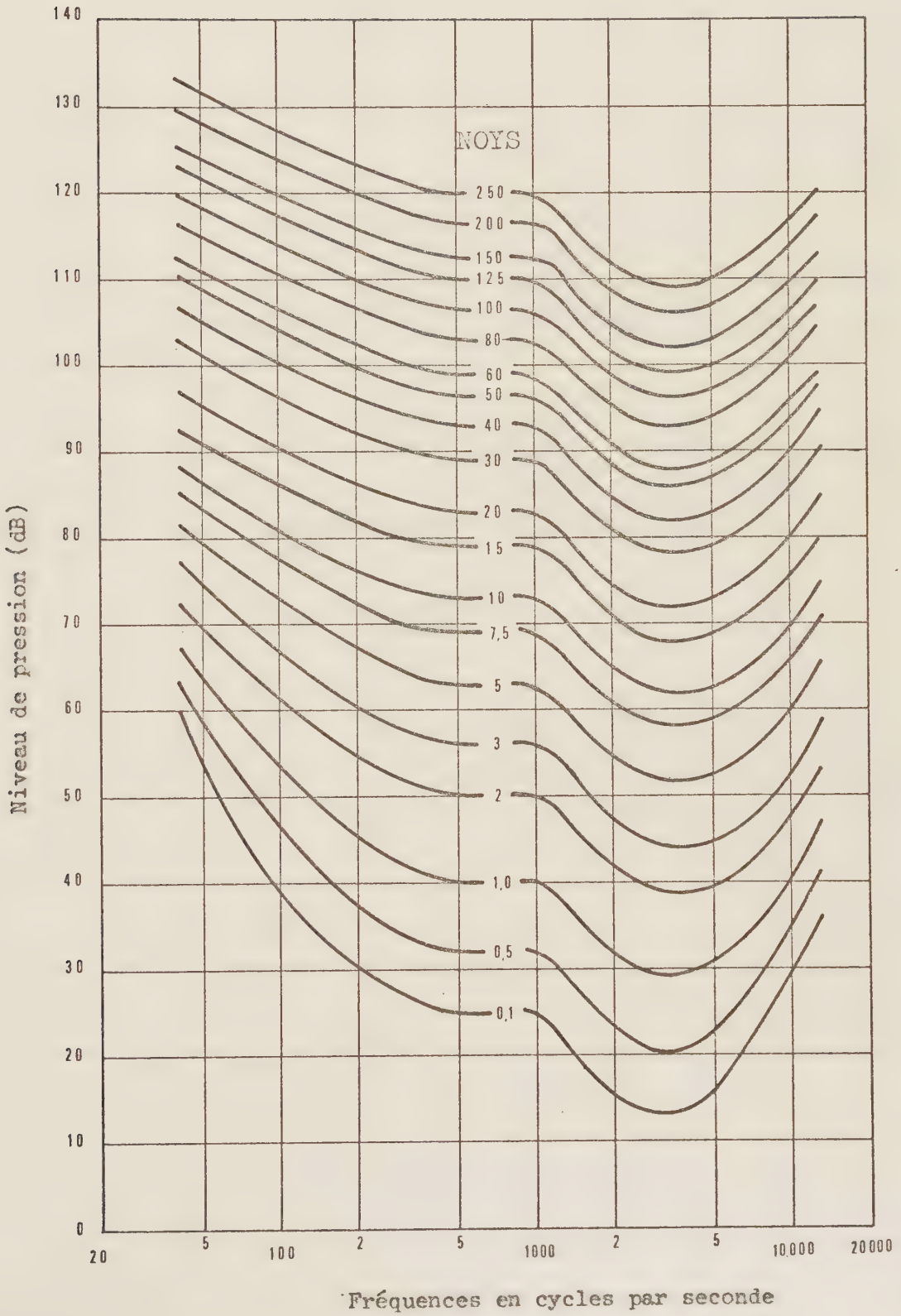
Première phase.

Recherche sur ordinateur d'un programme de filtre unique fournissant sur un grand nombre de spectres des résultats aussi voisins que possible de ceux obtenus en programmant la table de Noys.

Cette partie de l'étude a été menée à notre demande à la Société Nationale Aérospatiale de TOULOUSE qui a réalisé cette opération sur plus de 2 000 spectres réels rassemblés au cours de différentes campagnes de mesure.

Fig. 14

COURBES D'ISONUISANCE



Les figures (15,16,17) résument le résultat de ce travail, il apparaît que l'écart entre les résultats de la mesure "normalisée" et la mesure effectuée à travers le filtre optimisé n'excède pratiquement pas $\pm$ 1 dB. Cette dispersion étant jugée très acceptable, on retient donc le gabarit représenté figure (18) qui est très voisin - au calage en niveau près de l'inverse de la courbe de 40 Noys.

deuxième phase.

Réalisation du filtre avec les impératifs d'adaptabilité. Le principe retenu pour la synthèse est celui de la figure (19).

Un tel filtre dont la réalisation technologique est représentée sur le schéma de la figure (20) répond aux exigences de réglage précédemment imposées.

troisième phase.

Mise en oeuvre.

Elle a été réalisée au cours d'un vol de certification effectué par un avion "Caravelle". On place en un même endroit du terrain lespostesde mesure représentés figure (21).

Le résultat de la mesure s'inscrit en temps réel sur l'enregistreur graphique, on reporte ensuite le résultat calculé de la mesure après traitement de la bande magnétique obtenue sur le poste de mesure classique. Le résultat de l'opération est représenté figure(22).

3.2.3. *Perspectives et intérêt.*

En ce qui concerne les filtres de sensation

Fig. 15

COMPARAISON DES NIVEAUX GLOBAUX EN PNdB ET dBN AVION MYSTERE 20

avec exemples de répartitions spectrales

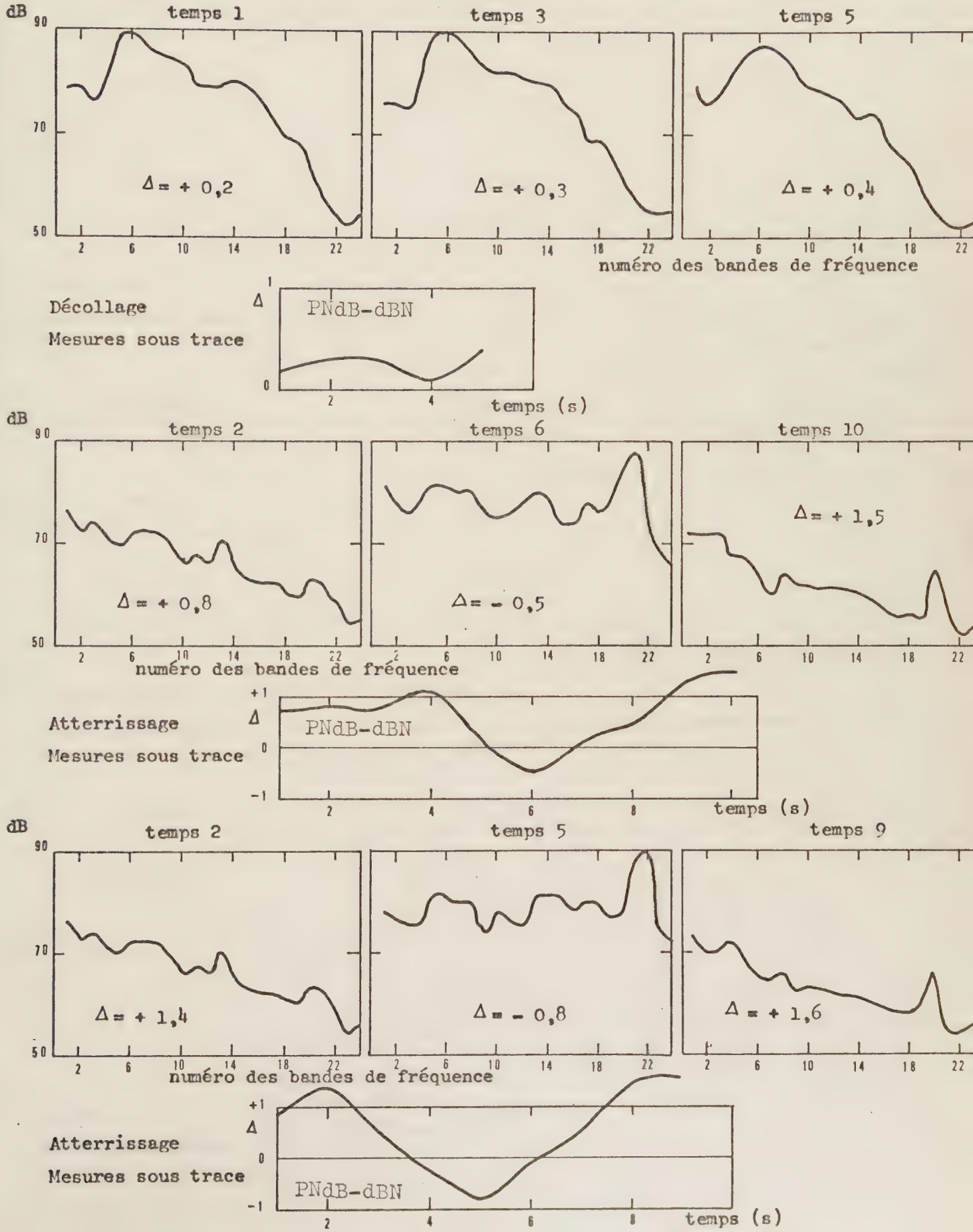


Fig. 16

COMPARAISON DES NIVEAUX GLOBAUX EN PNdB ET dBN AVION CARAVELLE 10B3
avec exemples de répartitions spectrales

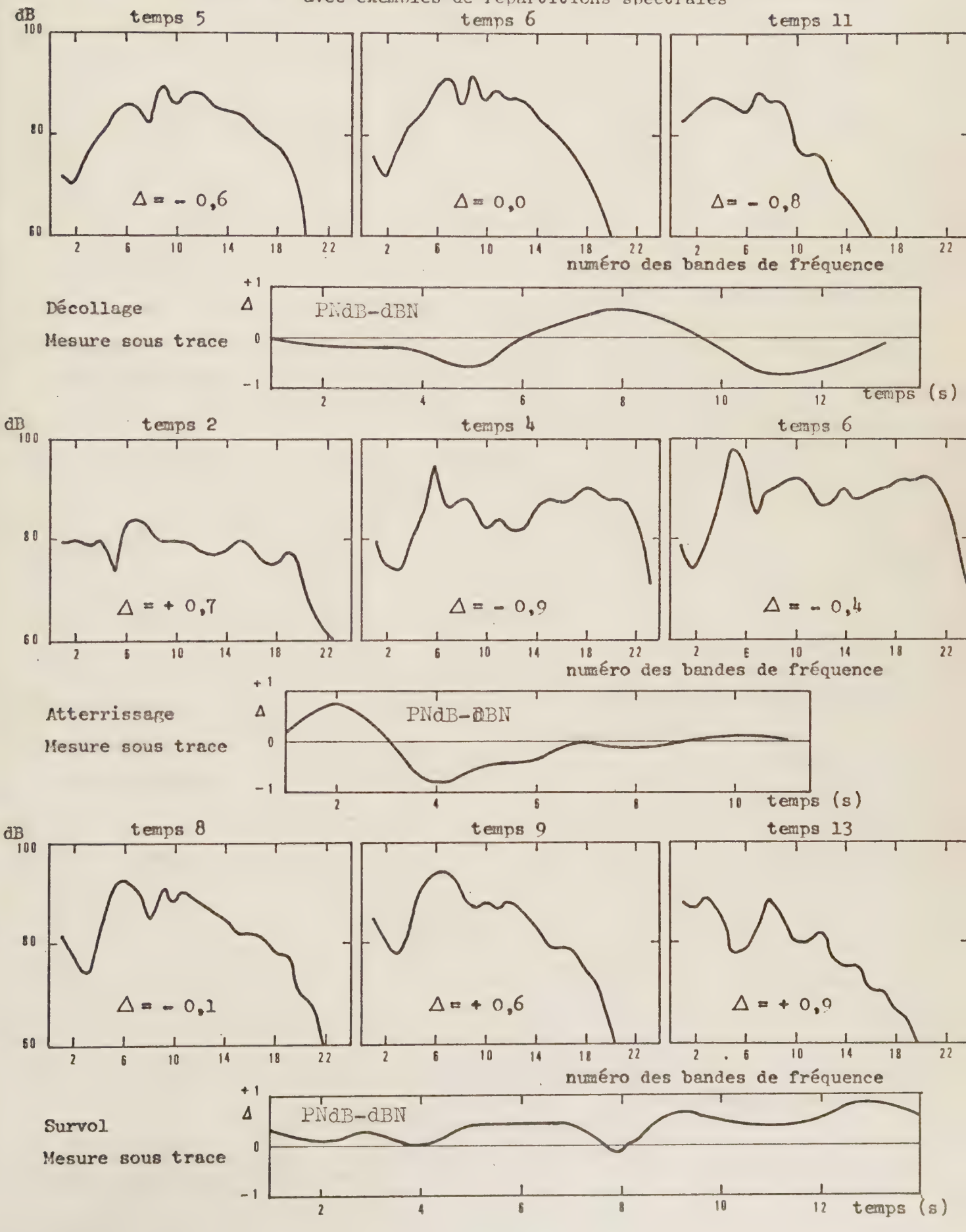
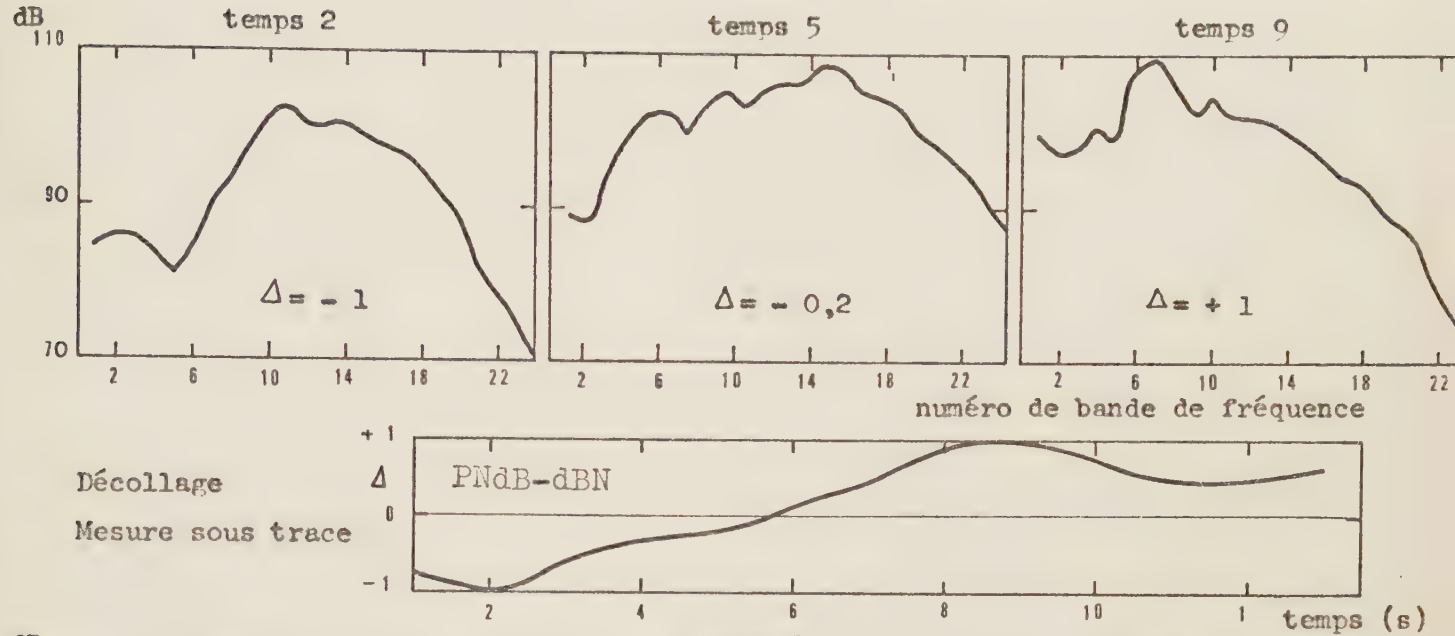
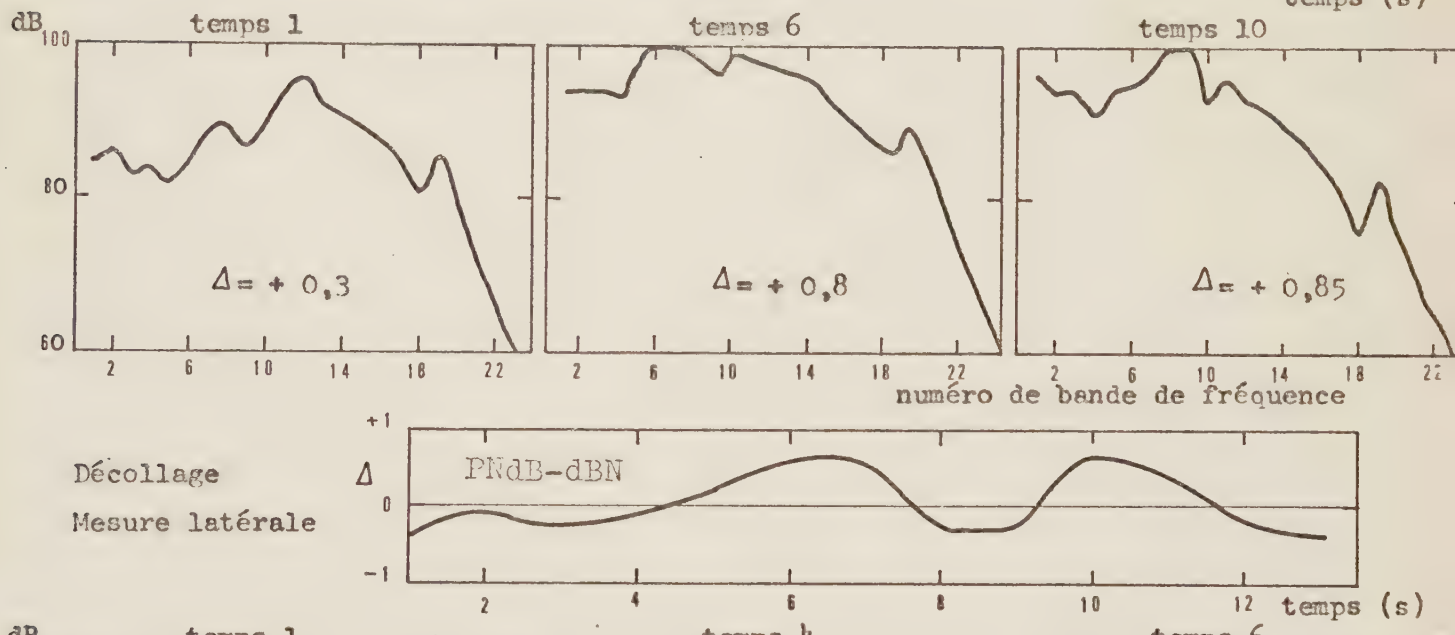


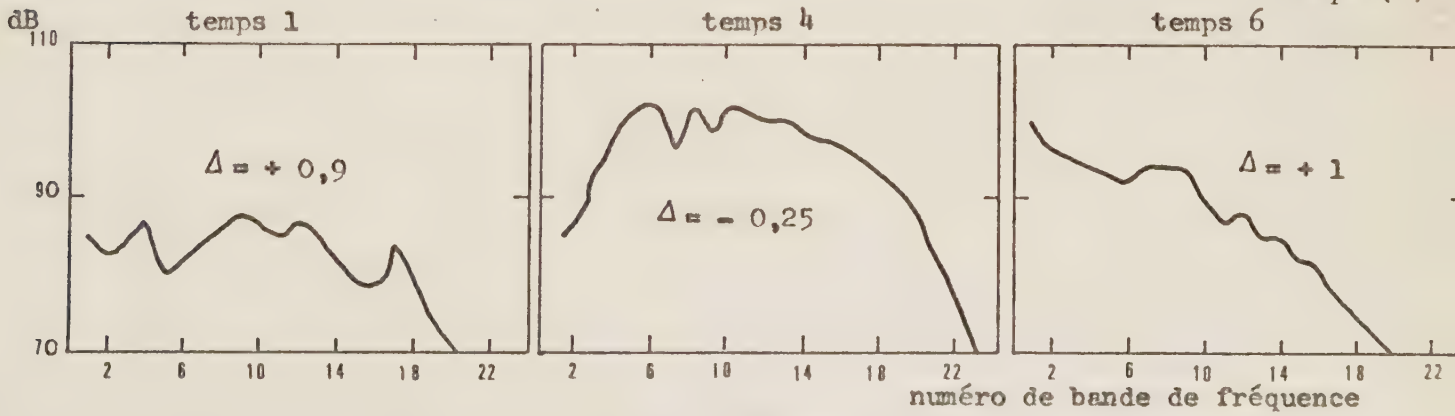
Fig. 17

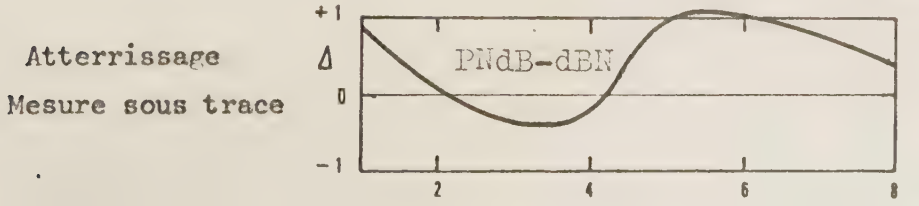
COMPARAISON DES NIVEAUX GLOBAUX EN PNdB ET dBN AVION CONCORDE 001

avec exemples de répartitions spectrales









FILTRE CORRECTEUR DE 40 NOYS
dB
20
15
10
5
0
-5
-10
1
2
3
4
5
6
7
8
9
10
11
12
13
14
15
16
17
18
19
20
21
22
23
24
63
125
250
500
1K
2K
4K
8K
Hz
bande de fréquence

Fig. 18

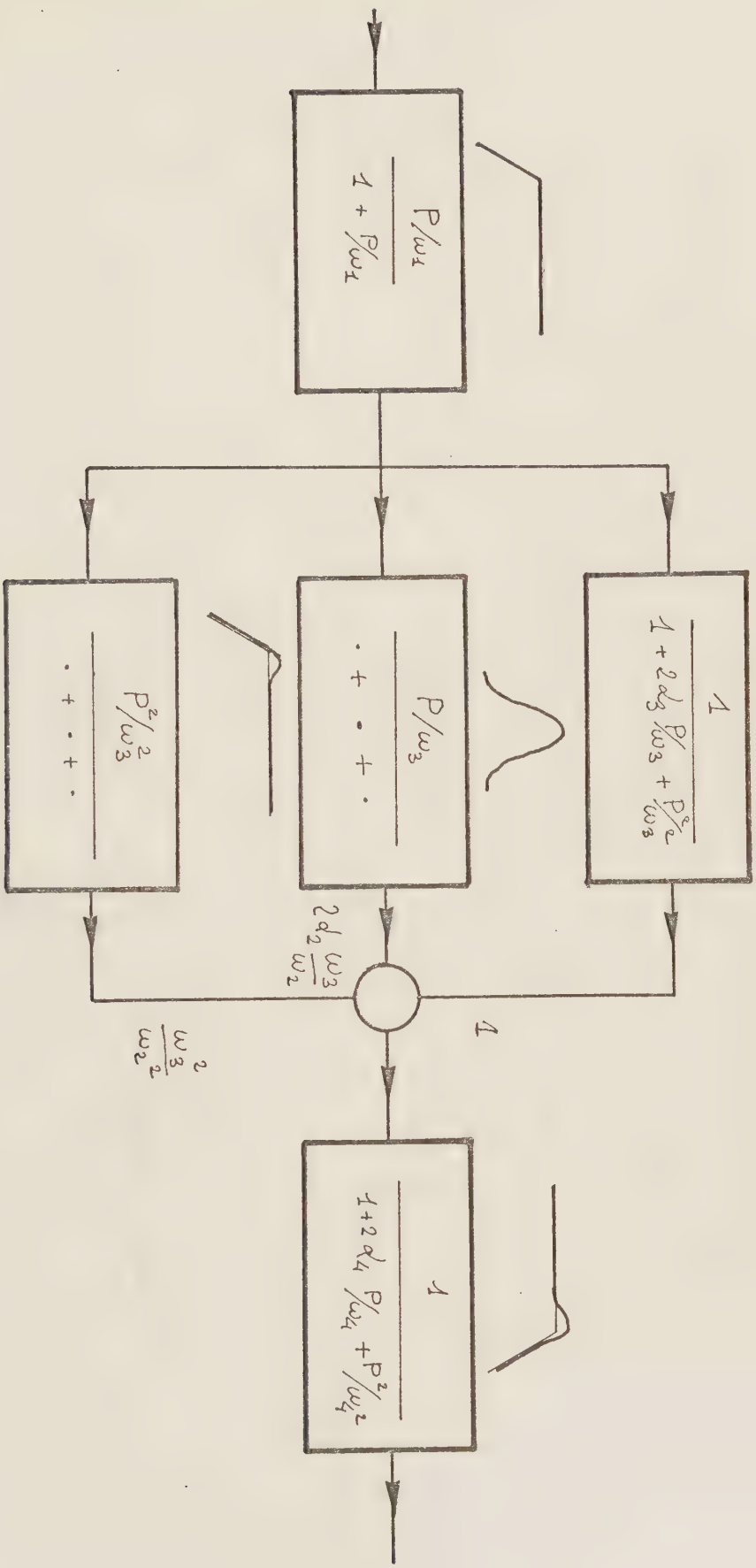


Fig. 19

Synthèse du filtre D.

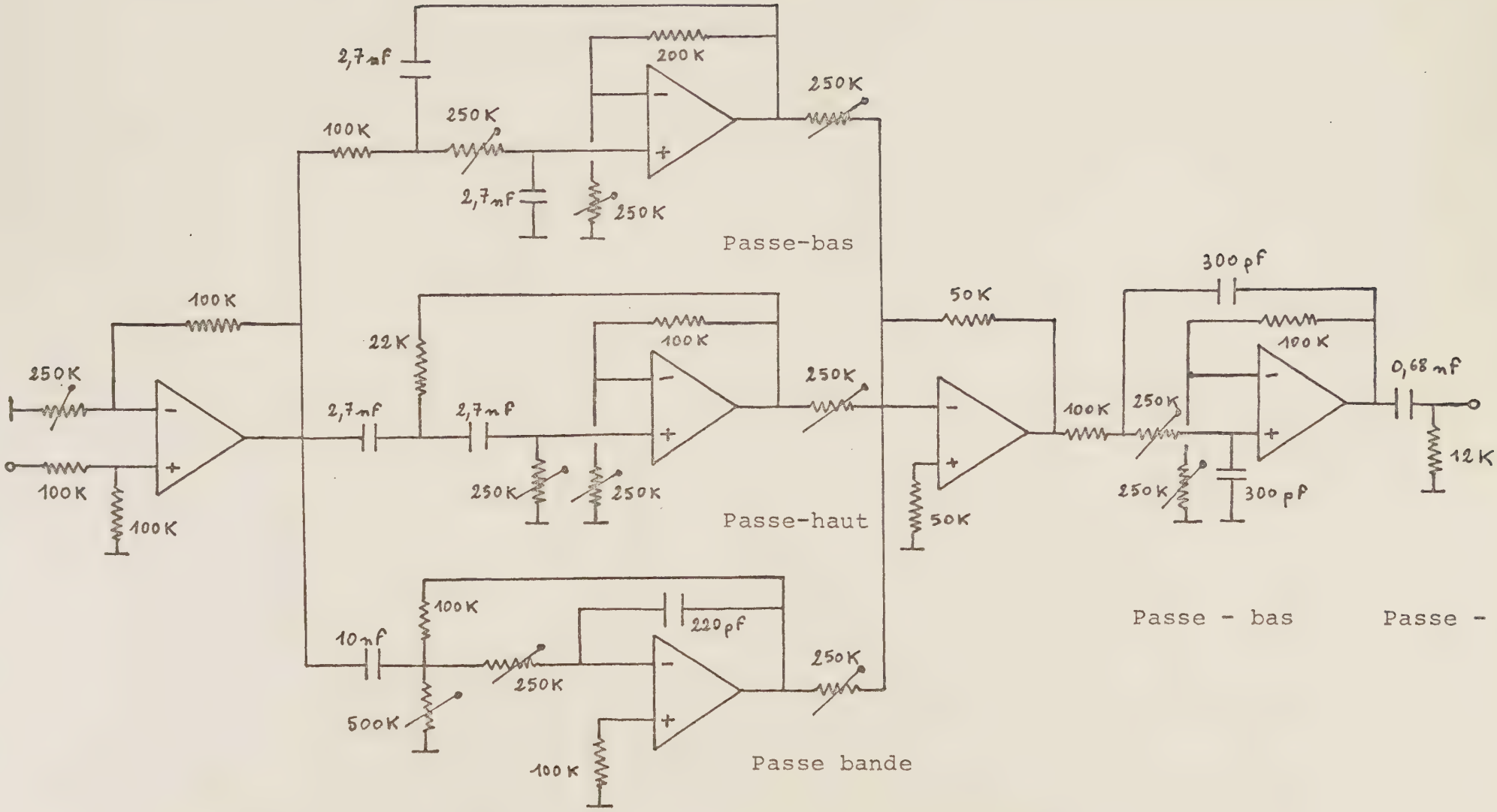
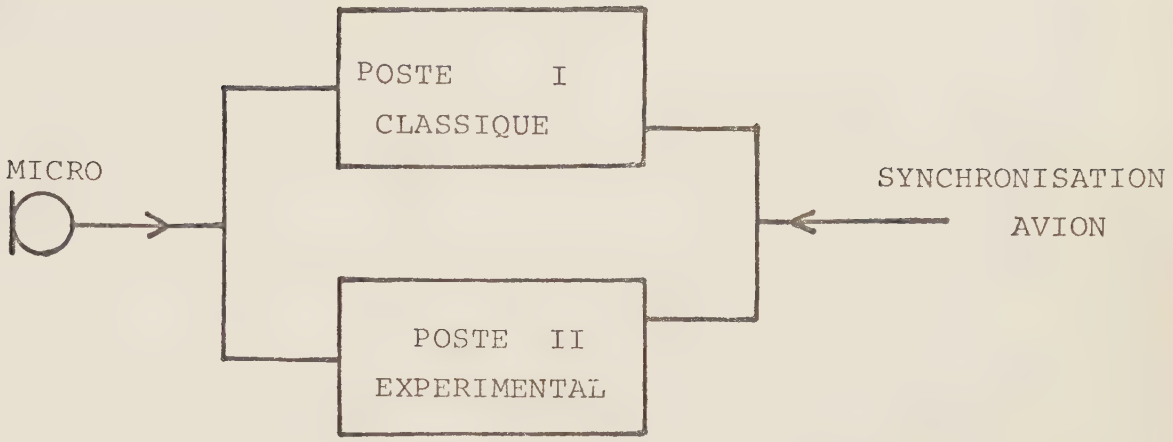


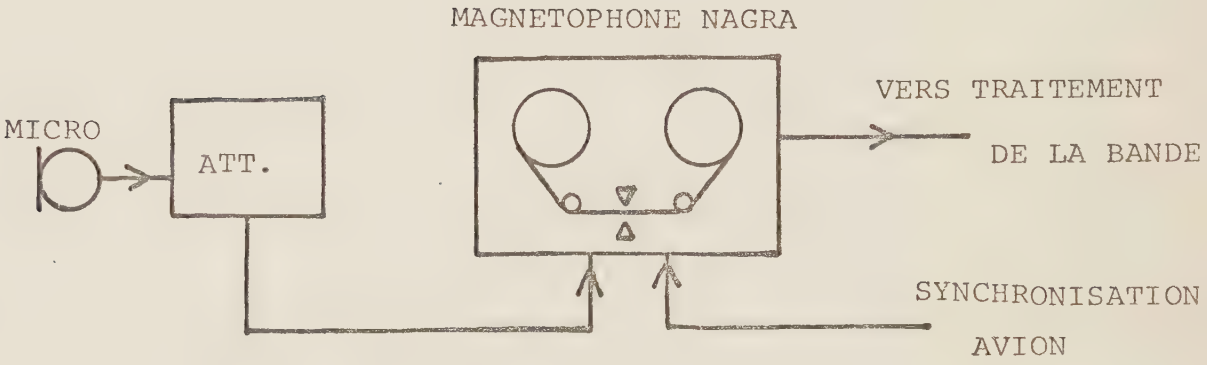
Fig. 20

Schéma électrique du filtre D.

a)



b)



c)

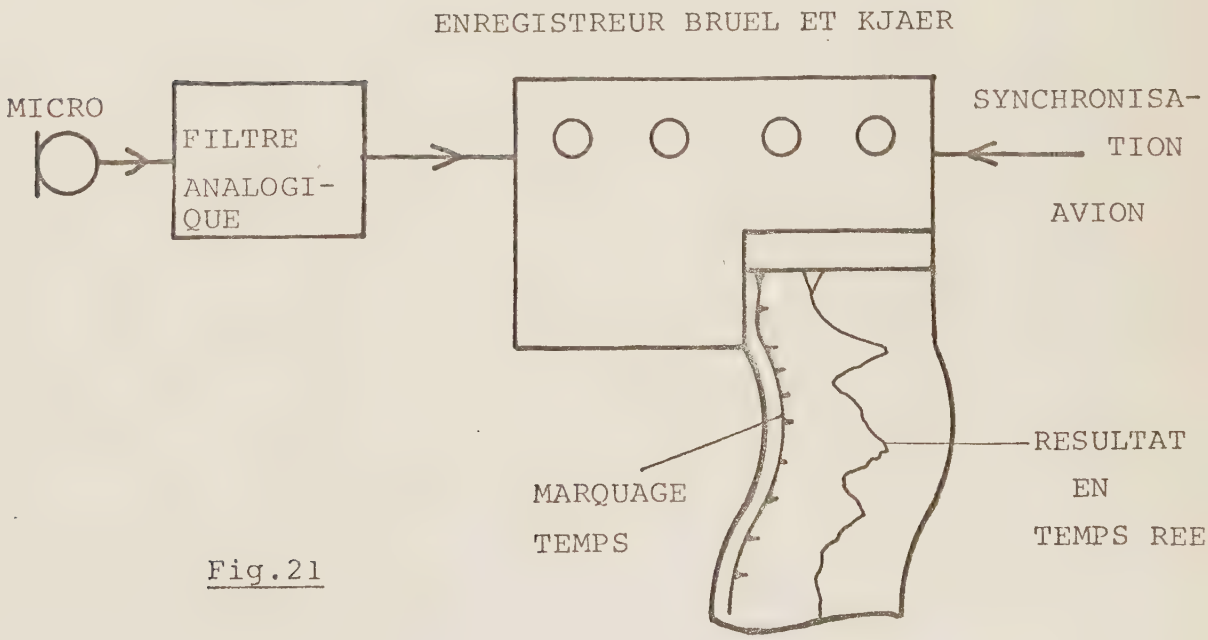


Fig.21

a) Schéma de principe de deux postes de mesure.

b) schéma du poste classique

c) schéma du poste expérimental

● Points de mesure calculés obtenus à partir du poste I.

Résultat en temps réel obtenu sur le poste de mesure II.

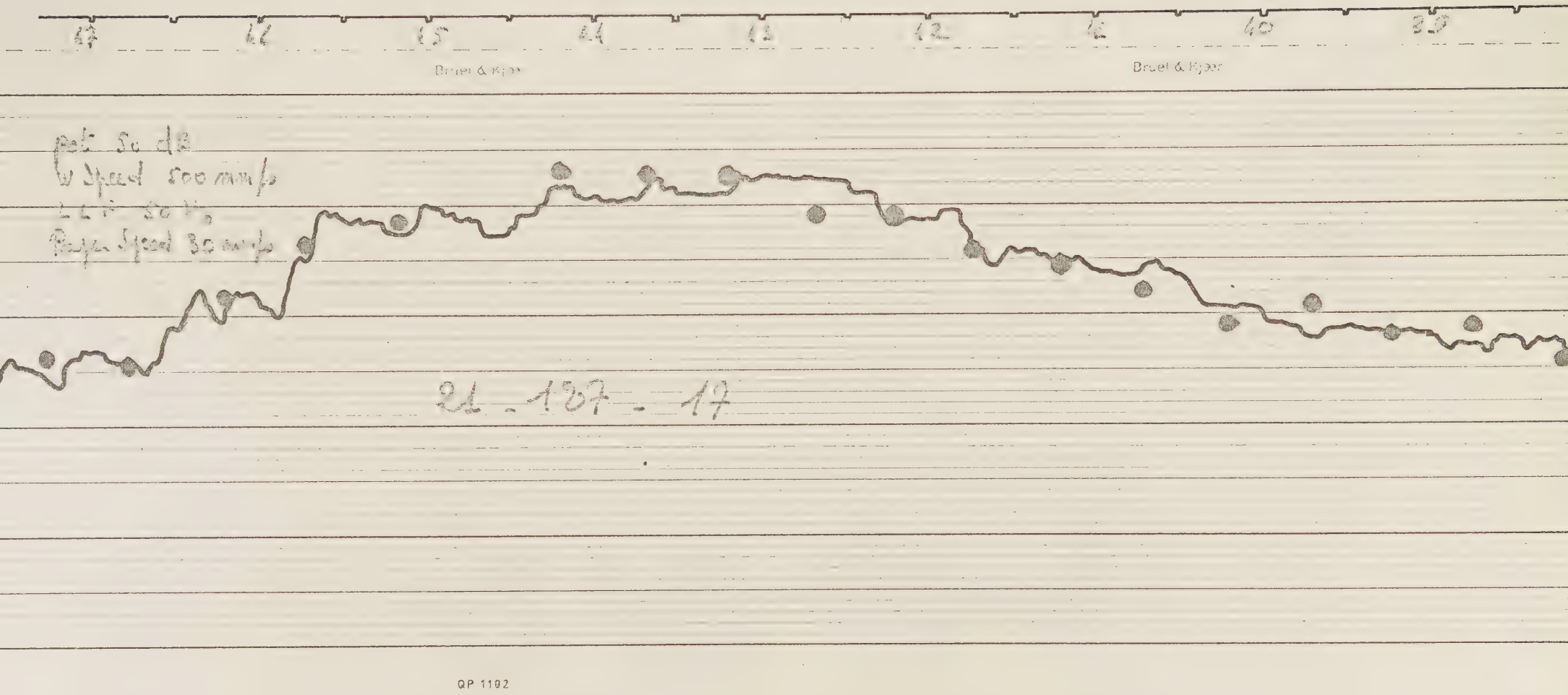


Fig. 22.

Comparaison des résultats des deux postes de mesure.

autoadaptatifs, l'étude a perdu de son intérêt pratique dès l'instant ou le dB(A) est devenu la seule unité employée dans les mesures de bruit courants, de ce fait, il n'est pas utile de réaliser l'interpolation continue entre les trois filtres.

Sur le plan fondamental, il nous apparaît de plus en plus douteux que pour la perception des objets sonores complexes, le réseau de FLETCHER et MUNSON présente l'intérêt qu'on lui a attribué jusqu'à ces dernières années.

Reste l'intérêt général présenté par un système non linéaire faisant l'objet d'un asservissement non linéaire avec un impératif d'autoadaptativité. L'approche théorique d'un tel problème échappe pour l'instant à notre compétence (ref 31).

Les filtres de nuisance par contre sont peut-être appelés à simplifier,et la technique des mesures, et la comparabilité des résultats, le travail réalisé pour les bruits d'origine aéronautique peut être entrepris pour d'autres types de bruits (circulation automobile par exemple).

Dès lors, on pourrait peut-être caractériser la nuisance de différents bruits par des unités faisant intervenir une pondération spectrale spécifique mais telles, que deux résultats s'exprimant par le même nombre correspondraient à des bruits de nuisance comparable.

Une étude spectrale statistique portant sur les bruits de circulation urbaine nous permettra peut-être de progresser dans cette voie.

3.3. *SOLUTIONS AU PROBLEME DE LA DYNAMIQUE.*

3.3.1. *Les exigences de la dynamique.*

Les phénomènes acoustiques que l'on est appelé à mesurer, se situent dans une dynamique importante, entre les 25 dB que l'on peut observer en milieu rural calme et les 110 à 120 dB qui caractérisent le passage d'un avion à basse altitude, on peut estimer à 80 dB au minimum la plage que doit couvrir un instrument de mesure.

Si l'on ajoute à cela que le facteur de crête des signaux mesurés peut atteindre une valeur de 10, il conviendrait d'atteindre une dynamique de 100 dB. Ce problème se pose à quatre niveaux :

le capteur :

En général, le domaine de linéarité des microphones à condensateur modernes est supposé s'étendre à de telles dynamiques, ce qui constitue une prouesse technologique (rapport des pressions extrêmes mesurables = 10^5). On peut donc considérer comme résolu le problème du capteur (avec réserve car les méthodes d'étalonnage par réciprocité s'appliquent à des niveaux de pression acoustique de l'ordre 90 dB et on ne connait pas le moyen d'étalonner le micro dans toute l'étendue de sa dynamique)(ref 32).

les amplificateurs :

Il est difficile d'atteindre de telles performances notamment avec des circuits intégrés qui constituent la technologie la plus souhaitable pour ces instruments. Du côté des bas niveaux, les problèmes de bruit de fond ne

peuvent être résolus par les techniques par ailleurs courantes en électronique (le signal est lui-même un bruit et on est en présence d'impératifs de bande passante : 10 octaves au moins). Du côté des forts niveaux, il faut éviter les distorsions et l'altération éventuelle du facteur de crête.

Enfin, les exigences classiques de stabilité du gain se posent d'autant plus que ces instruments sont appelés à travailler dans des conditions sévères (insensibilité à la température, absence de microphonie. etc..)

le détecteur.

Le principe de la mesure impose une loi de détection quadratique. Bien que cette loi soit sommairement définie dans la Norme (ref 17), il importe pour éviter les dispersions de résultats de réaliser une loi aussi rigoureusement parabolique que possible, stable, s'étendant sur les 100 dB de dynamique acoustique. Même à l'aide de composants modernes, de telles performances sont difficiles à atteindre.

l'instrument de lecture.

Il faut après la détection quadratique réaliser une loi logarithmique pour que la lecture s'effectue en décibels. Sur les sonomètres classiques, on adopte une graduation non linéaire du cadran de l'appareil de lecture.

Mis à part le fait que l'on effectue sur une telle échelle une lecture à erreur relative constante - ce qui est un avantage - cette méthode présente des inconvénients nombreux (la tension de sortie du détecteur n'est utilisable ni par d'autres instruments analogiques linéaires, ni bien sûr par un calculateur).

Enfin, si l'on veut exploiter convenablement sur toute la dynamique la résolution de l'ensemble de mesure, il faut obligatoirement passer à une représentation numérique du résultat (indépendamment de tous les autres avantages que cela comporte).

Pour toutes ces raisons, il nous a paru indispensable de résoudre le problème de la dynamique par suppression même du problème, deux artifices nous ont permis de l'éliminer:

- la compression logarithmique analogique du signal mesuré (ref 33).
- le fractionnement numérique de l'étendue dynamique mesurable (ref 34).

3.3.2. Solution analogique.

Le principe en est donné fig (23). Une étude théorique générale des systèmes de compression de dynamique a été menée au Laboratoire depuis 1967. (ref 35).

Le dispositif comprend une chaine d'amplification constituée par trois amplificateurs A_1, A_2, A_3 dont le gain variable est linéairement relié à une tension de commande V_1, un amplificateur A_4 dont le gain est commandé par la tension V_2. R est le détecteur quadratique qui fournit à partir de la tension de sortie des amplificateurs V_s une tension $\sqrt{V_s^2}$ à deux générateurs de fonctions :

B amplificateur linéaire
C générateur de fonction exponentielle

La boucle de rétroaction C conduit à obtenir en sortie du système une tension liée au logarithme de la

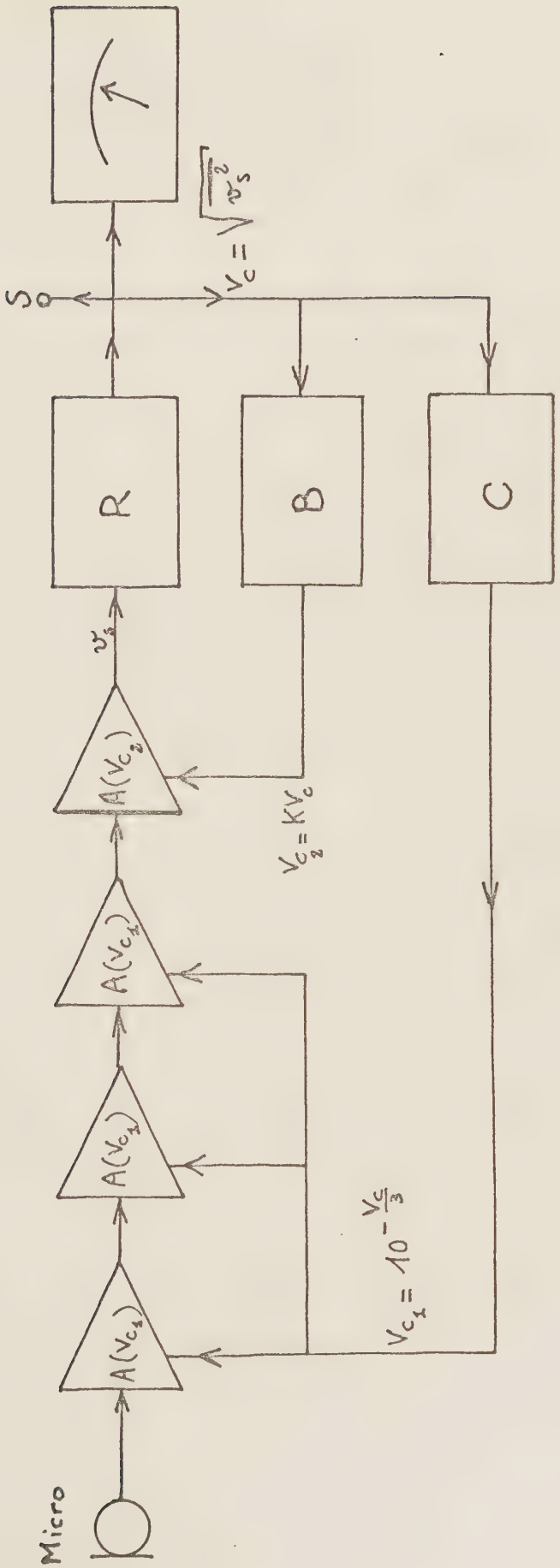


Fig. 23

Schéma de principe du compresseur.

tension de sortie V_c du détecteur, ce dernier réalisant la fonction "calcul de la valeur quadratique moyenne" on voit qu'à un coefficient près, la tension de sortie est reliée linéairement au niveau de pression acoustique exprimé en décibels.

Un tel système associé à un réseau de FLETCHER et MUNSON autoadaptatif se présenterait donc comme un simulateur de sensation sonore. Utilisé avec un seul filtre du type "A", c'est un sonomètre à grande dynamique fournissant une indication linéaire en décibels du niveau sonore mesuré.

Quelques difficultés se présentent dans son assimilation avec les sonomètres normalisés, notamment en ce qui concerne la constante de temps; en effet un tel dispositif est mieux caractérisé par sa "vitesse de poursuite " des phénomènes acoustiques exprimée en dB/sec, que par sa constante de temps de détection classique.

Les avantages en sont nombreux : le contenu spectral du signal est conservé, on dispose d'une tension de sortie permettant l'enregistrement du niveau sonore en décibels à l'aide de n'importe quel enregistreur graphique, il est possible d'envisager une restitution de la dynamique initiale du signal, ce qui permettrait de résoudre certains problèmes de transmission ou d'enregistrement des signaux acoustiques (un magnétophone à enregistrement direct ne peut accepter plus de 40 dB par exemple).

La maquette de définition ayant été réalisée a donné satisfaction quant à la validité des principes du système, notre travail porte actuellement sur l'amélioration des performances obtenues en mettant en oeuvre une technologie plus avancée.

3.3. Solution Numérique.

Elle repose sur le principe exposé dans le bloc diagramme de la fig. (24) (ref 36). $A_1 \ldots A_n$ sont des amplificateurs de gain déterminé qui peuvent présenter deux états :

- Etat 1 : gain nominal
- Etat 2 : pas de gain
  (amplificateur court-circuité)

R est le détecteur quadratique, Sb et Sh des circuits comparateurs dont la tension de sortie commande un ensemble logique capable d'agir sur le nombre d'amplificateurs en service.

Le fonctionnement schématisé est le suivant :

- si la tension détectée issue de R est comprise entre V_{sb} et V_{sh}, le système reste en l'état.

- si $V_R > V_{Sh}$, la logique agit en diminuant le nombre d'amplificateurs en service jusqu'au moment où $V_{Sb} < V_r < V_{Sh}$.

- si $V_R < V_{Sb}$, la logique agit en augmentant le nombre d'amplificateurs jusqu'au même résultat final $V_{Sb} < V_r < V_{Sh}$.

Le gain de la chaine A_n est donc réglé de façon autoadaptative, il est représentatif de la mesure du niveau sonore à l'entrée. Le détecteur quadratique travaille toujours dans une dynamique réduite (l'intervalle V_{Sb} V_{Sh} augmenté du facteur de crête que l'on se propose d'admettre).

Le premier instrument réalisé selon ces principes

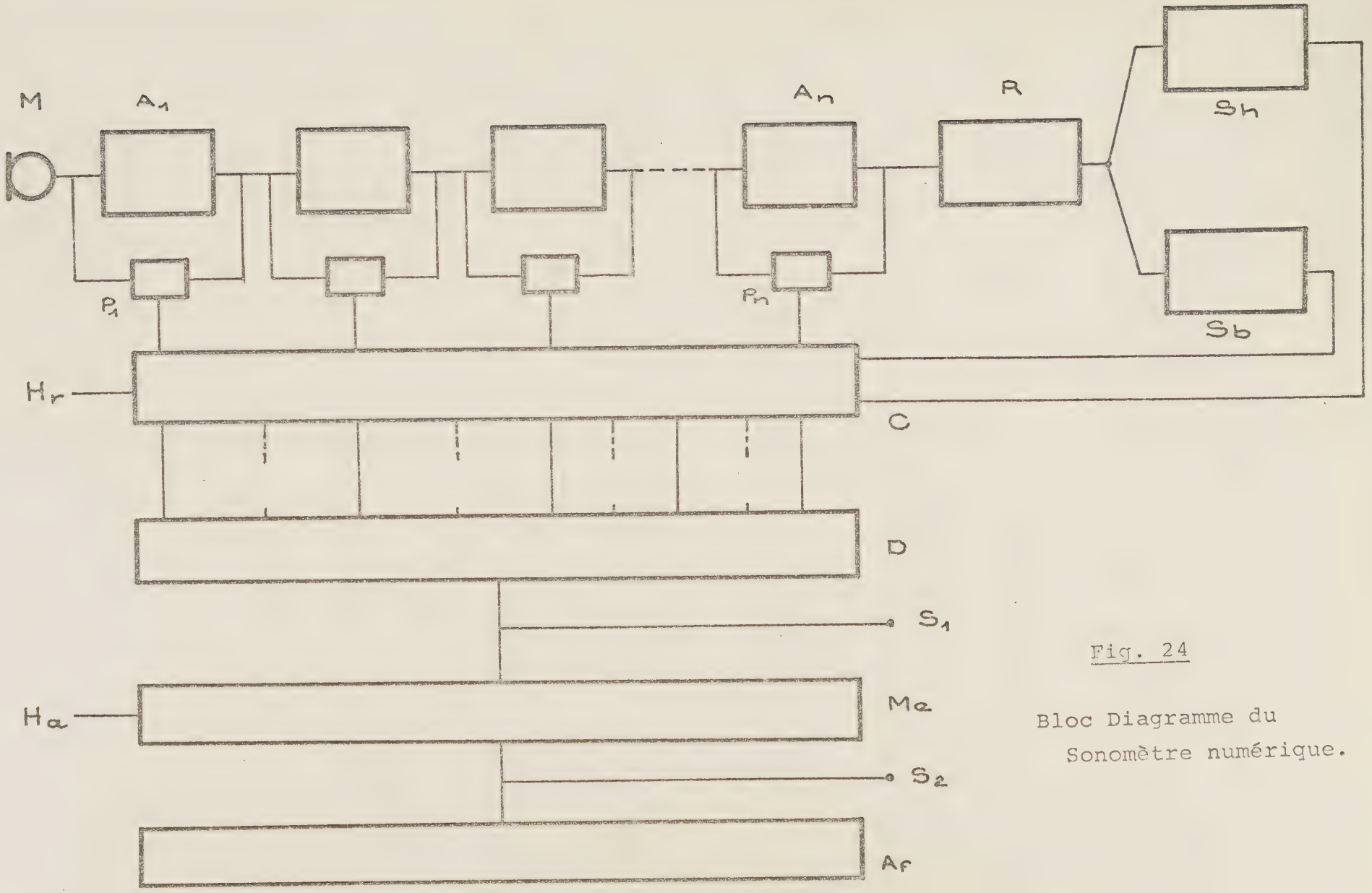


Fig. 24

Bloc Diagramme du
Sonomètre numérique.

était un "classeur de niveaux sonores", tous les amplificateurs A_n possédaient un gain identique, la résolution du classement était de 5 dB.(ref 37). Une telle réalisation présente actuellement un renouveau d'intérêt en vue du contrôle des ambiances sonores à long terme.(ref 25).

Toutefois pour réaliser un sonomètre à partir de ce principe, il convient :

- d'augmenter la finesse de la résolution.
- de ne pas alourdir la chaine d'amplification.

A cet effet, nous avons diminué l'intervalle $V_{Sb}\ V_{Sh}$ (1 dB + ε) et utilisé des amplificateurs non identiques dont les gains peuvent être répartis selon le principe de la "boite de poids".

Un tel appareil est actuellement en voie de réalisation industrielle. Ce système est donc lui aussi un compresseur de dynamique mais il travaille par valeurs discrètes du gain de chaine. Sur le plan fondamental de la simulation de la sensation auditive, on peut l'associer avec un réseau discret de filtres dont la mise en service serait assurée par la logique. Il s'agirait donc d'une"oreille discrète" dont la stabilité pourrait être difficile à réaliser en présence d'un objet sonore dont la mesure pondérée vue à travers deux filtres voisins, s'exprimerait par deux nombres différents.

Dans la perspective métrologique, le système présente les avantages suivants :

- Il est possible de faire face aux exigences normalisées en matière de constante de temps (bien que la recommandation en vigueur (ref 17) soit dépourvue de signification au point de vue acoustique - il n'existe pas en effet de phénomènes acoustiques mesurables ayant une dynamique infinie).

- le système travaille aisément sur 80 dB qui peuvent être positionnés où l'on veut dans l'échelle des niveaux sonores que l'on souhaite mesurer.

- l'acquisition de la mesure du niveau de bruit est fondamentalement numérique, on en verra l'intérêt plus loin.

- il est possible de faire par unité de temps autant de mesures que le permet la valeur de la constante de temps normalisée.

- l'adjonction de mini-programmes de traitement des signaux logiques de commande permet de réaliser facilement des opérations métrologiques d'un grand intérêt en matière de contrôle de l'Environnement : recherche des valeurs extrémales du bruit, intégration de la nuisance par exemple.

3.4. SOLUTIONS AU PROBLEME DE LA PRESENTATION DES RESULTATS.

3.4.1. L'indication analogique linéaire en décibels.

La représentation graphique de l'évolution temporelle des niveaux de bruit est d'un grand intérêt en vue du contrôle de l'Environnement acoustique, elle n'est actuellement possible que si l'on utilise des instruments spécifiques du type enregistreur potentiométrique logarithmique. (à titre indicatif, il n'existe sur le plan international que deux constructeurs fabricant de tels instruments) (ref 38).

On a vu que les sonomètres classiques ne permettent pas une telle représentation (dynamique insuffisante, non linéarité de l'échelle), quant aux analyseurs de spectre en temps réel, ils ne permettent cette représentation que moyennant la mise en oeuvre d'un ordinateur complété par un élément périphérique de visualisation.(ref 1)

Le premier instrument décrit au paragraphe 3.3.2. permet cette opération sans difficultés. Pour l'instrument décrit en 3.3.3.numérique dans son principe de mesure, il nous a paru utile d'étudier un système de visualisation expressive des résultats qui sera décrit en 3.4.3.

3.4.2. L'indication numérique.

Si la représentation analogique du résultat de la mesure est de loin la plus expressive pour l'opérateur chargé de l'étude du bruit à long terme, il faut noter à l'actif d'une présentation numérique des résultats les avantages suivants :

- absence d'erreur de lecture.
- appréciation objective de la résolution de la mesure.
- Intérêts d'un résultat codé permettant le stockage, la transmission, le traitement en temps réel ou en temps différé des résultats de mesure.

L'instrument décrit en 3.3.2, analogique dans son principe demandera un convertisseur analogique à numérique pour obtenir le résultat recherché.

Il suffira de mesurer la tension de sortie V_s avec un voltmètre numérique classique du type intégrateur à rampe pour numériser le résultat de la mesure. On notera

au passage, compte tenu de la précision qu'il est possible d'attendre des mesures acoustiques qu'une définition de la gamme de mesure par 1000 points seulement sera largement suffisante.

L'instrument décrit en 3.3.3. est infiniment plus facile à exploiter dans ce sens, en effet, l'état de la logique de commande des amplificateurs est représentatif à une constante additive près du résultat de la mesure.

Il suffit donc de décoder ou mieux de transcoder l'état logique du système de commande pour obtenir directement ce résultat : la fig(25) montre dans le cas d'une chaine d'amplificateurs non identiques comment l'information "résultat de la mesure" est extraite sous forme parallèle du système logique de commande du gain.

3.4.3. La présentation des résultats à long terme.

En examinant attentivement le résultat de quelques expériences de contrôle de l'Environnement acoustique, il nous a paru que l'efficacité du contrôle reposait en grande partie sur la facilité d'interprétation des résultats de mesure. De ce point de vue, les colonnes de chiffres délivrées par des imprimantes parallèles de même que le "listing" issu d'un ordinateur présentent un intérêt très médiocre.

Notre travail dans le sens de cette présentation des résultats a visé trois objectifs principaux :

- éviter au stade de la présentation des résultats la mise en oeuvre d'un ordinateur à la fois pour des raisons économiques et des raisons de principe, l'ordinateur sera en effet mieux utilisé si on se propose de faire des

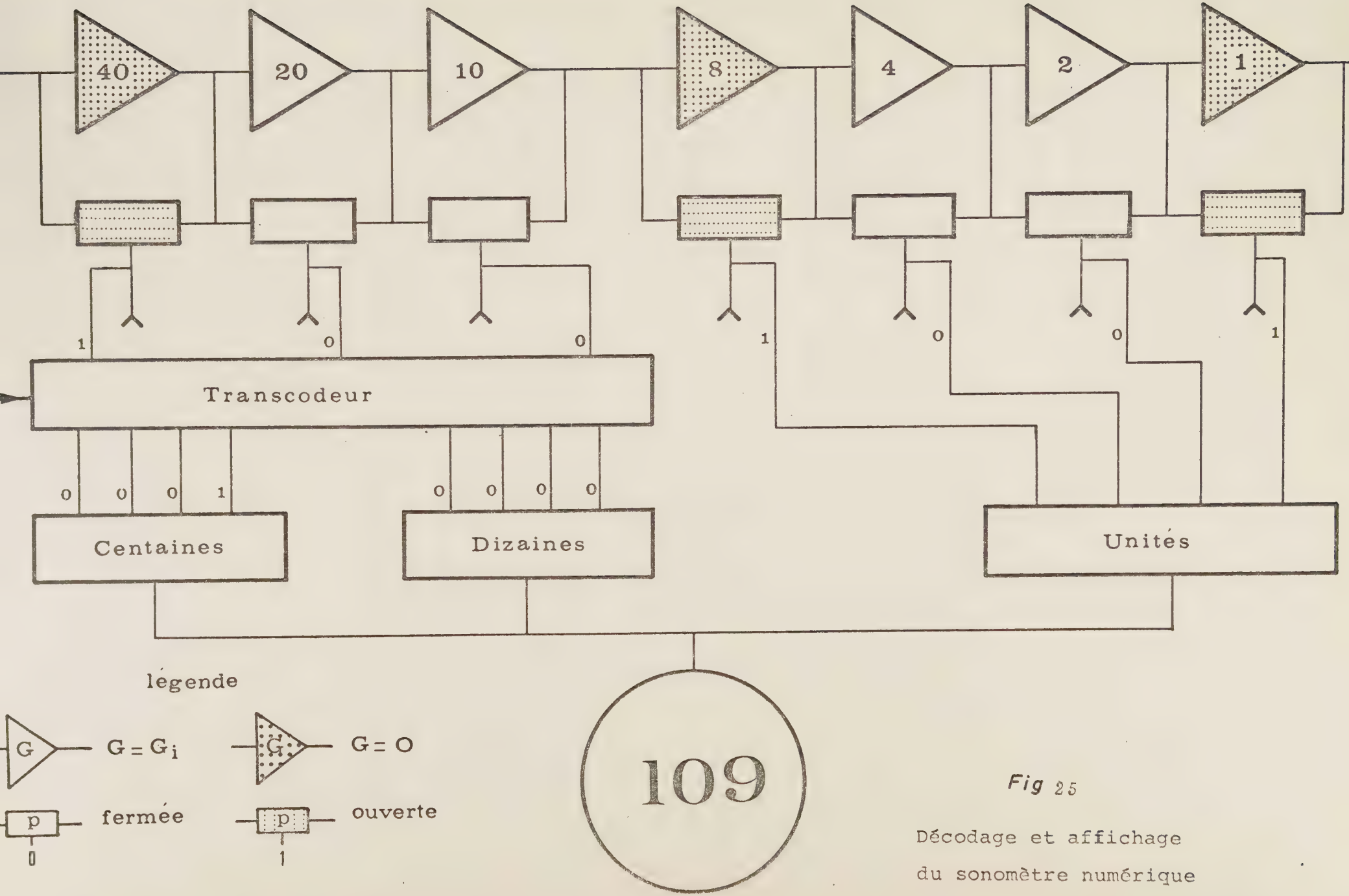


Fig 25

Décodage et affichage
du sonomètre numérique

études plus complexes portant sur des résultats de mesure convenablement choisis (études statistiques par exemple).

- obtenir une visualisation expressive des résultats en vue d'une exploitation efficace.
- faire en sorte que la cadence d'acquisition des données acoustiques soit fonction de l'intérêt qu'elles présentent.

La figure (26) présente, sous forme de Bloc diagramme le dispositif réalisé en vue d'atteindre les objectifs précédents. Ce système comporte un générateur de format fixe dans lequel vient s'insérer l'expression numérique parallèle de l'heure, on obtient ainsi en début de ligne sur une imprimante du type "téléimprimeur", la date de la mesure.

Un générateur de format variable autorise l'impression de points tant que le décompte binaire de caractères n'a pas atteint la valeur représentative dé la mesure, lorsque cette valeur est atteinte, il en autorise l'inscription numérique.

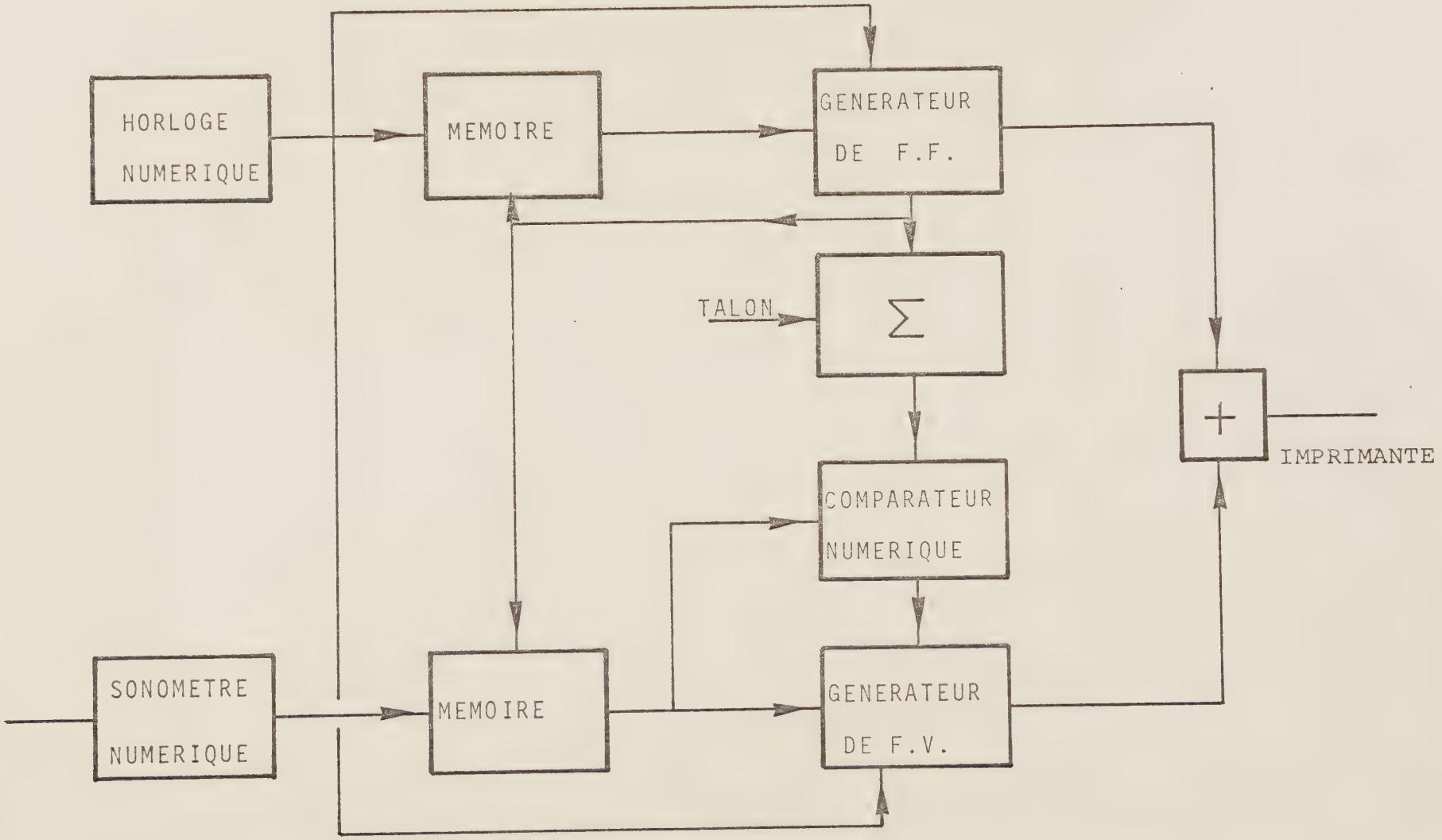
De la sorte, le résultat numérique de la mesure s'inscrit à une distance du bord de page représentative de la valeur mesurée. Le résultat d'une série de mesurer s'inscrit donc sous la forme d'un document dont un extrait est donné fig (27). Il s'agit ici d'un exemple de réduction de bruit au décollage effectué par un avion commercial en respectant la procédure anti-bruit de réduction du régime moteur (ref 1 et 12).

L'autoadaptativité du système en vue de la surveillance acoustique peut être réaliséede façon aisée. Le principe en est le suivant :

L'exploitant fixe un niveau de bruit au-dessous

Fig. 26

Système de visualisation expressive



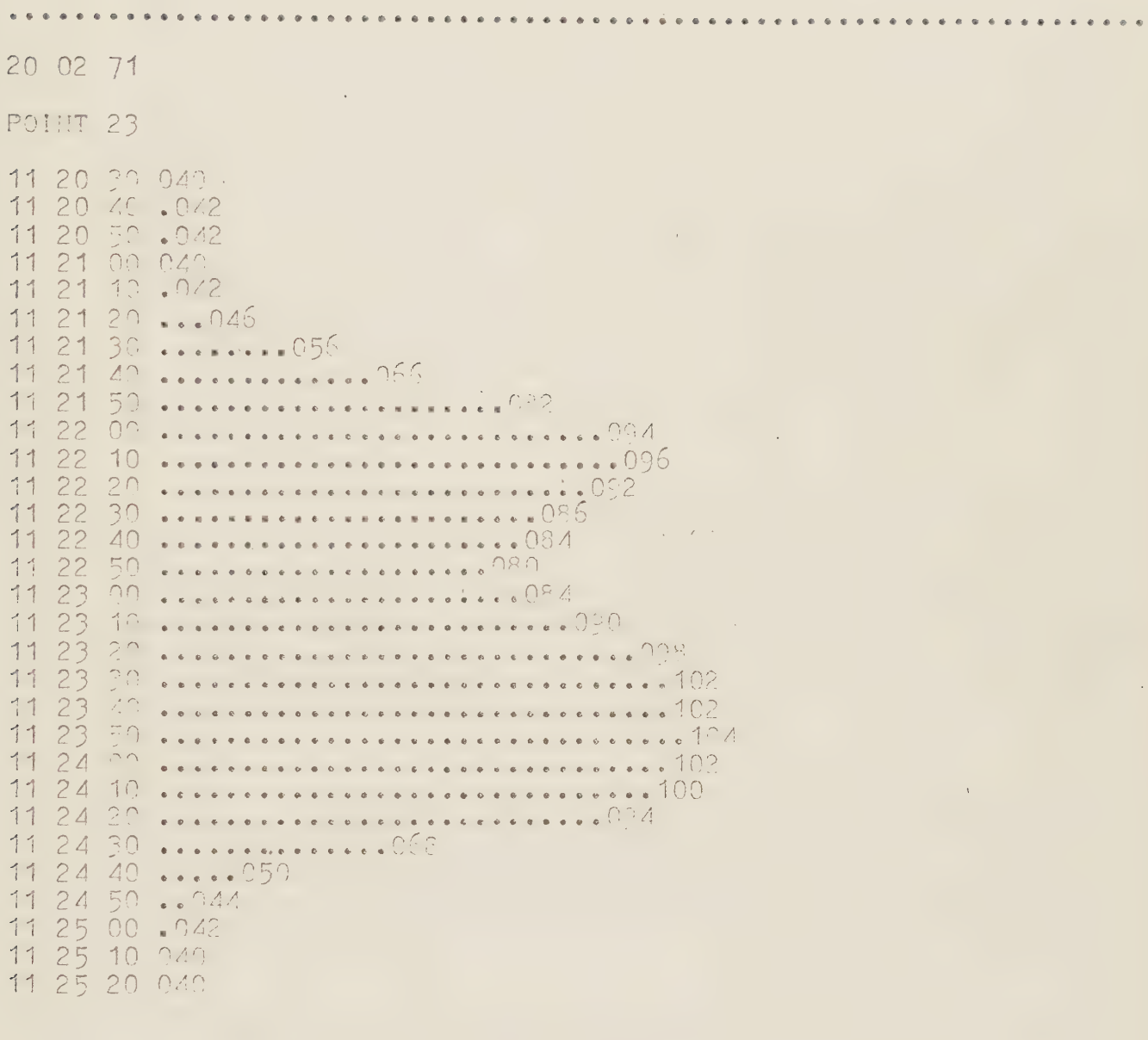


Fig. 27

Enregistrement d'un survol
avec procédure de réduction
de bruit.

duquel la nuisance est considérée comme négligeable.

Tant que ce niveau n'est pas atteint, la cadence de mesure reste faible et très inférieure à la vitesse d'impression des résultats. On peut pendant ces périodes de "veille" programmer les différents contrôles et étalonnages du système d'acquisition de données. Quand le niveau sonore atteint et dépasse la valeur mise en consigne, la cadence d'acquisition des mesures devient beaucoup plus rapide et de ce fait, risque d'être supérieure à la vitesse d'impression des résultats, il convient alors d'utiliser une mémoire tampon qui va restituer l'information ainsi acquise lorsque le système se remettra en état de veille dans les conditions définies ci-dessus.

La meilleure façon de constituer une telle mémoire consiste à insérer une perforatrice rapide dans le canal d'acquisition des données et de commander par un dépassement de seuil sa cadence d'enregistrement, la mémoire sera constituée par le "mou" de la bande perforée qui sera résorbé pendant les périodes de veille.

Un tel dispositif qui conduit à un léger retard dans la présentation des résultats, réalise donc l'adaptation automatique des performances du système de mesure en fonction de l'intérêt du résultat présenté par ces dernières.

3.5. *VERS UNE NOUVELLE METROLOGIE.*

3.5.1. *Exigences fonctionnelles du contrôle de l'Environnement.*

Il est extrêmement difficile d'exprimer avec

certitude quelles sont les exigences fonctionnelles d'un système de mesure complexe destiné au contrôle de l'Environnement acoustique. En effet, une meilleure connaissance des effets du bruit sur l'organisme est indispensable pour mieux fixer les caractéristiques d'un environnement acceptable et les seuils d'apparition de la nuisance. Cela relève de l'étude médicale et sociopsychologique mais cette dernière n'est possible qu'à partir d'une bonne connaissance de l'Environnement. Il importe donc de sortir d'un cercle vicieux et d'adopter en la matière une attitude pragmatique basée sur des observations réalistes rendues plus faciles grâce aux solutions que nous proposons. On pourra sans doute progresser dans ce domaine de la connaissance si on arrive :

- à multiplier les observations par des mesures plus nombreuses et moins onéreuses.
- à réaliser des observations à long terme, le temps joue sans doute un rôle très important en ce qui concerne l'effet des nuisances.
- à ne retenir que les résultats intéressants en vue de leur exploitation statistique.
- à effectuer des mesures d'un type nouveau telles que celles proposées au chapitre suivant.
- à se rendre maitres de certains environnements ou à défaut à les simuler.
- à concerter les études physiques, physiologiques psychologiques et sociologiques.

L'évolution des concepts des méthodes et des techniques métrologiques ne peut raisonnablement être envisagée que dans ce cadre général de préoccupations.

3.5.2. Exemple d'acquisition d'une grandeur de type nouveau.

En se basant sur un certain nombre d'observations

relatives à la gêne provoquée par les bruits (ref 39), on peut sous une forme encore mal connue, essayer de prendre en compte les observations suivantes :

- la variation momentanée du niveau sonore est plus gênante dans certaines conditions, que la présence continue de ce niveau. (ref 40).

- les"pointes" de bruit isolées provoquent une gêne qui dépend plus de leur durée que de leur niveau.

- la vitesse d'évolution du bruit (ref 41) notamment pour les bruits de véhicules est un facteur de gêne.

Avec les instruments précédemment décrits, nous effectuons actuellement sur des bruits de circulation urbaine des mesures ainsi définies :

première_mesure :

le sonomètre automatique (3.3.3.) reçoit la consigne "Recherche du Niveau minimal".

deuxième_mesure :

la consigne précédente est remplacée par "Recherche du niveau maximal".

Ces résultats sont traités par le dispositif de visualisation expressive (3.4.3.). On obtient un document caractéristique dont un exemple est donné fig (28).

Sur ce document, on peut apprécier à tout moment de la journée la valeur maximale de l'écart bruit de fond - pointe de bruit. Il est très vraisemblable que l'intégrale définie entre les deux enveloppes présente une signification sur le plan de la nuisance, aucun critère connu ne permet

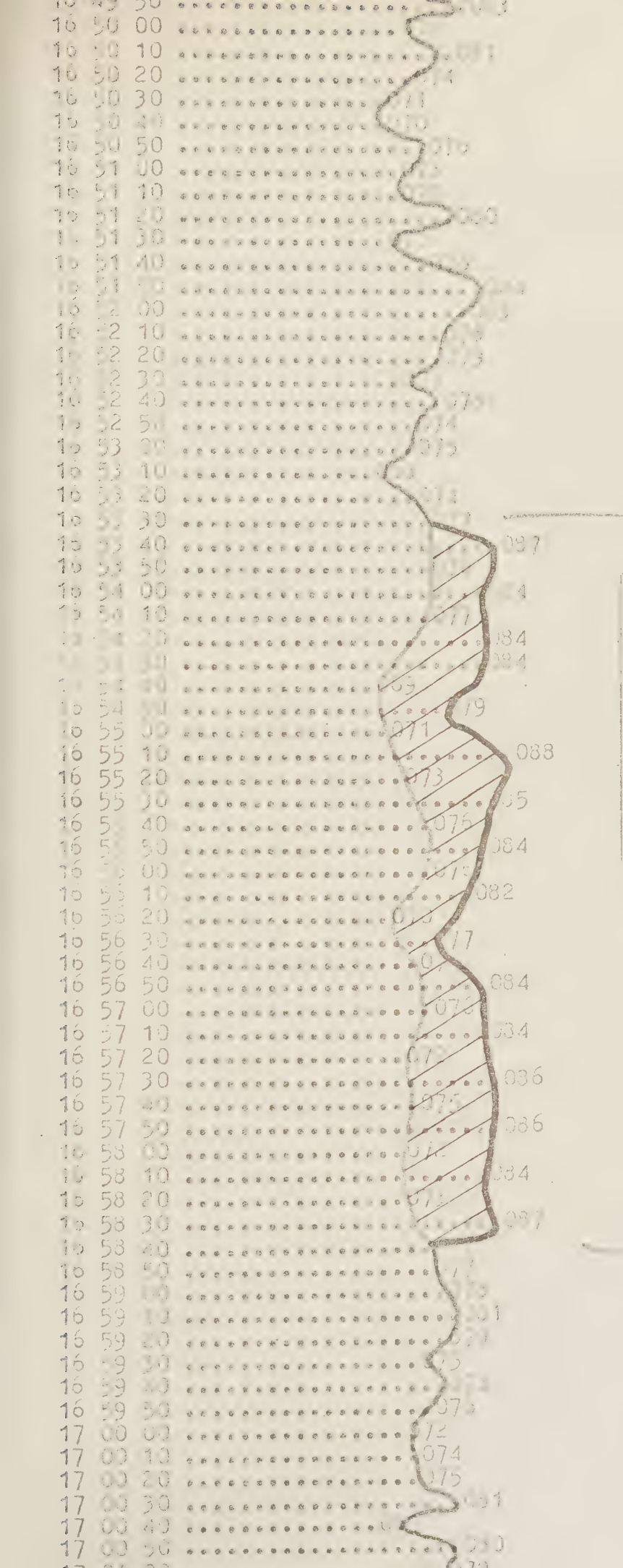


Fig. 28

Recherche alternative
de minimum et de maximum.

actuellement de la prendre en compte et de la chiffrer. Toutefois, c'est la donnée physique indispensable à une étude psychophysiologique.

Bien entendu, la bande perforée porteuse du document visualisé peut être exploitée par l'informatique et moyennant la conception de programmes judicieux, permet de compléter la description physique du phénomène.

Les résultats de l'étude à entreprendre pourront à leur tour fournir des éléments pour un programme d'estimation de la nuisance et pour modifier éventuellement le mode d'acquisition des données.

On notera qu'aucun des instruments de mesure existant sur le marché actuel ne permet l'obtention immédiate et économique d'un tel document.

-=-=-=-

C O N C L U S I O N

=-=-=-=-=-=-=

Seule une partie des travaux que nous poursuivons actuellement a été exposée dans cette brève synthèse, il s'agit essentiellement de la mesure du bruit, mais, l'appréciation de l'Environnement acoustique dépasse cette seule préoccupation.

Le confort acoustique d'un local d'habitation ou d'un lieu de travail fait intervenir le "temps de réverbération", grandeur difficilement mesurable contrairement à ce que laisse supposer la lecture des normes (ref 42). Nous menons donc des travaux dans ce sens.

Par ailleurs, il est à peu près certain maintenant que des phénomènes d'origine acoustique et non perceptibles, infra sons et ultra sons doivent être considérés comme facteurs de nuisance et dans ce domaine aussi, nous avons commencé des investigations (ref 44), qui vont nécessiter de nouvelles méthodes et de nouveaux instruments de mesure.

Enfin, il manque à nos expériences une dimension importante, celle de la mise en service en vraie grandeur d'un système de contrôle de l'Environnement acoustique prenant en compte par exemple, tous les bruits de circulation urbaine d'une ville d'au moins 200.000 habitants (ref 45).

Il est certain qu'une telle expérience conduira à de nouvelles vues dans le domaine de la mesure.

Ce qui importe "in fine", c'est que les instruments et les méthodes mis en oeuvre dans une telle perspective ne soient pas destinés à des constats d'impuissance, mais permettent de prendre les décisions propres à sauvegarder et améliorer notre Environnement acoustique.

Ce sont les résultats obtenus dans ce sens qui nous permettront de juger du bien fondé des conceptions métrologiques exposées dans le présent travail.

-=-=-

B I B L I O G R A P H I E

-=-=-=-=-

L'énumération exhaustive de toutes les références bibliographiques utilisées au cours de plus de dix années de Recherche ne nous a pas paru possible. Il nous a semblé préférable de présenter la bibliographie essentielle sous deux aspects.

-Références bibliographiques citées dans le mémoire dans l'ordre de leur apparition dans le texte.

-Bibliographie générale.

Le présent travail étant la synthèse d'un certain nombre de publications, la bibliographie précédente est complétée par :

-La liste des principales publications de l'auteur.

-La liste des travaux scientifiques effectués sous sa direction.

-=-=-=-=-

REFERENCES CITEES DANS LE TEXTE.

=-=-=-=-=-=-=

1. J. GAUDRON

"Contribution à l'étude du bruit des avions. Technique et traitement numérique de la mesure en vue de la certification et de la prévision du bruit des aéronefs."

Thèse de Doctorat d'Université - TOULOUSE - Janvier 1971.

2. P. GRIMOUD. P.JOSSERAND. L. COMMANAY. R. GUIRAUD.

"Tympan artificiel. Mécanisme d'action de la prothèse rétro-tympanique de YEARSLEY. Expérience électro-acoustique et essais d'interprétation".

Annales d'oto-laryngologie -PARIS- T.82, n°10,11 Octobre 1965.

3. J.F.HOST.

"Les aspects juridiques de la lutte contre le bruit dans les locaux d'habitation".

Thèse de Doctorat de troisième cycle sous la direction de MM. DESPAX et JOSSERAND - Université de TOULOUSE II. A paraître 1972.

4. P.JOSSERAND.

"Méthodes et techniques nouvelles pour la mesure des bruits aéronautiques".

2° Colloque Français d'Acoustique Aéronautique - PARIS - Mai 1971. A paraître dans la Revue d'Acoustique.

5. L.PIMONOW

"Introduction à la bioinformatique de l'audition."

Ecole pratique des Hautes Etudes - PARIS-1969.

6. E.LEIPP

"Réflexions sur la mécanique et l'acoustique de l'oreille moyenne."

G.A.M.Bulletin n°49 - Septembre 1970.

7. B.VALLANCIEN; A.DIDIER.

"Le mécanisme de l'audition : l'adaptation"

Film 16 mm. Service du film de Recherche Scientifique.

8. C.WANSDRONK.

"On the mechanism of hearing"

Prom.Dr Ir.H.MOL. - AMSTERDAM - 1961.

9. P. SCHAEFFER.

"Traité des objets musicaux"
Essai interdisciplines. Editions du Seuil - 1966.

10. J.C.RISSET.

"Paradoxes de hauteur"

7° Congrès International d'Acoustique - BUDAPEST - Août 1971.

11. J.G.ROEDERER.

"The perception of music by the human ear".
Department of Physics - Université de DENVER - July 1971.

12. NOISE STANDARDS.

"Aircraft type certification"

FAAR. 36.

13. P.JOSSERAND.

"La mesure électronique des grandeurs acoustiques".

"Toute l'Electronique " A paraître.

14. R.LEHMAN.

"Les transducteurs électro et mécano acoustiques hauts parleurs et microphones".

Collection Technique et Scientifique du C.N.E.T. Editions CHIRON. 1963.

15. NORMES FRANCAISES.

"Vocabulaire de l'Acoustique".

N.F.S. 30. 001. - 1968.

16. NORMES FRANCAISES.

"Lignes isosoniques normales pour sons purs écoutés en champ libre et seuil d'audition binauriculaire en champ libre".

N.F.S. 30. 003. 1965.

17. COMMISSION ELECTRO TECHNIQUE INTERNATIONALE.

"Recommandations relatives aux sonomètres".

I.E.C. Publication 123. 1961.

18. COMMISSION ELECTRO TECHNIQUE INTERNATIONALE.

"Filtres de bande d'octave, de demi-octave et de tiers d'octave destinés à l'analyse des bruits et vibrations".

I.E.C. Publication 225. 1966.

19. L. BERANEK.

"Acoustic measurements".

WILEY. 1949.

20. ORGANISATION INTERNATIONALE DE NORMALISATION.

"Estimation du bruit par rapport aux réactions des collectivités".

I.S.O. R. 1996. Mai 1971.

21. ORGANISATION INTERNATIONALE DE NORMALISATION.

"Méthode de représentation du bruit des aéronefs au voisinage d'un aérodrome".

I.S.O. R.507. Octobre 1966.

22. NORMES FRANCAISES.

"Expression des caractéristiques physiques et des caractéristiques psycho physiologiques d'un bruit".

N.F.S. 30. 004. 1966.

23. NORMES FRANCAISES.

"Méthode de calcul du niveau d'isosonie".

N.F.S.30. 005. 1966.

24. WALSH HEALEY.

"Publics contracts act".
U.S. Department of labor. Section 50.204. 1969.

25. ORGANISATION INTERNATIONALE DE NORMALISATION.

"Estimation de l'exposition au bruit durant le travail en vue de la protection de l'ouïe".

I.S.O. R. 1999. Mai 1971.

26. J. SOEBERG.

"L'analyse en temps réel".

BRUEL et KJAER - Technical Review 1969. N° 4.

27. W.R. KUNDERT A. LAPOINTE. G.R. PARTRIDGE.

"T eration Acoustical Analyser".

G.I perimenter. Vol.43. Number 5.6. May/June 1969.

28. J.P. GUIL

"T yse de spectre en temps réel"

"(l'Electronique" à paraître.

29. J.P. GUILHOT JOSSERAND.

"Ré ation à l'aide d'une jonction bloquée d'un fil à commande électrique travaillant aux fréquences aco ques"

C.R ad. Sc. - PARIS.- T.261. Septembre 1965.

30. ORGANISATIO RNATIONALE DE NORMALISATION.

" llance du bruit des avions autour d'un aéroport"

R.1791. Juin 1970.

31. C.MIRA.

"Et des systèmes asservis non linéaires"

E.N .I.H.T. 1966.

32. P.RIETY.

"E nage absolu des microphones"

C on B.N.M. N° 4/4/69/.

33. J.P. GUIL AIS. P. JOSSERAND.

"P tionnement aux sonomètres à grande gamme de mes et à indicateur logarithmique"

B NVAR. N° PV. 69.05.777.

34. P.JOSSERAND. C. AZAIS. J. FARRE.

"Appareil automatique de mesure et d'analyse des bruits dans les champs sonores de grandes dimensions".

Brevet ANVAR. 1.569.7161.

35. J.P. GUILHOT.

"Convertisseur logarithmique à détection quadratique. Application à la métrologie des grandeurs acoustiques".

Thèse de Doctorat de Spécialité Electronique. TOULOUSE. Juin 1969.

36. C. AZAIS.

"Contribution à l'étude des environnements acoustiques de l'homme. Etude et réalisation d'un système d'acquisition numérique de la mesure acoustique".

Thèse de Doctorat de spécialité Electronique. TOULOUSE. Juin 1969.

37. P. JOSSERAND.

"Réalisation d'un indicateur numérique destiné à la mesure automatique des bruits de centrales thermiques".

Rapport d'étude. Convention E.D.F. Juin 1970.

38. J.T.BROEH. C.G. WAHRMAN.

"Effective averaging time of the level recorder type 2305".

BRUEL et KJAER. Technical Review n° 1. 1961.

39. J.C. MERY.

"Caractères, effets et évaluation des bruits intermittents dans l'industrie et l'habitat".

Thèse de Doctorat en Médecine. STRASBOURG - 1968.

40. COMMISSION TECHNIQUE D'FTUDE DU BRUIT

"Avis de la Commission d'Etude du Ministère de la santé publique concernant l'estimation des troubles produits par l'excès de bruit".

Revue d'Acoustique n° 8. 1969.

41. J.C.LAFON.

"Effets du bruit sur l'homme au travail".

Journée d'information sur l'ergonomie.-LYON - 1964

42. NORMES FRANCAISES.

"Mesure de la durée de la réverbération des auditoriums".

Norme expérimentale N.F.S. 31.013.- 1969.

43. G. SONNTAG.

"Mesure du temps de réverbération par la méthode de Schroeder. Réalisation d'un montage d'étude".

Thèse de Docteur Ingénieur.- TOULOUSE - A paraître.

44. M. SABOUNTCHI.

"Contribution à l'étude des bruits de circulation urbaine. Niveaux relatifs dans les domaines sonore, ultra sonore et infra sonore".

Thèse de Doctorat d'Université - TOULOUSE - Juin 1971.

45. P. JOSSERAND.

"Sur quelques aspects du problème des bruits en milieu urbain".

Colloque "Nuisances de notre Environnement"-PARIS- Mai 1971.

46. J. MATTEI.

"De la nécessité d'une harmonisation des méthodes d'évaluation des bruits".

3° Congrès A.I.C.B. PARIS. Mai 1964.

B I B L I O G R A P H I E

G E N E R A L E

-=-=-

- Collection du J.A . S. A

" THE JOURNAL OF THE ACOUSTICAL SOCIETY OF AMERICA ".

- Collection du "TECHNICAL REVIEW", édité par la Société BRUEL et KJAER. NAERUM - DANEMARK.

- Collection du "EXPERIMENTER" édité par la Société GENERAL RADIO WEST CONCORD - MASSACHUSETTS. - U.S.A.

- Collection de la "REVUE D'ACOUSTIQUE" éditions I.P.F. sous l'égide du G.A.L.F

- Collection "CONFERENCES DES JOURNEES D'ETUDES" du Festival International du Son. Editions CHIRON.

-=-=-

PUBLICATIONS DE L'AUTEUR RELATIVES A LA METROLOGIE ACOUSTIQUE A L'ACOUSTIQUE PHYSIOLOGIQUE, A LA LUTTE CONTRE LE BRUIT.

-=-=-

1. P.JOSSERAND. P. GRIMOUD. L. COMMANAY. R. GUIRAUD.

"Mécanisme d'action de la prothèse rétro-tympanique de YEARSLEY. Expérience électro Acoustique et essais d'interprétation."

Annales d'oto-rhino-laryngologie.-PARIS.- T.82. N° 10,11. pp.819-824. 1965.

2. P. JOSSERAND. R. GUIRAUD. P. GRIMOUD. C.PEYRAUD.

"Etude physique d'un tympan artificiel."

Revue de Médecine de TOULOUSE. Vol. I. N° 6. pp.453-459. 1965.

3. P. JOSSERAND. J.P. GUILHOT.

"Réalisation à l'aide d'une jonction bloquée d'un filtre à commande électrique travaillant aux fréquences acoustiques."

CR. Académie des Sciences. T.261.pp.2307.2308. Groupe 5. 1965.

4. P. JOSSERAND. C. AZAIS. J. FARRE.

"Appareil automatique de mesure et d'analyse des bruits dans les champs sonores de grandes dimensions."

Brevet Français n° 142.106.- 1569.716. Mars 1968.

5. P. JOSSERAND. C. AZAIS.

" Métrologie des bruits d'aérodromes. Apport des techniques numériques et nouvelles possibilités d'investigation".

1° Colloque Français d'Acoustique Aéronautique. TOULOUSE - MARS 1968.

6. P. JOSSERAND. C. AZAIS.

"Le problème de la mesure des bruits à long terme". Revue d'Acoustique. N° 6. Vol. 2. pp.133-136.1969.

7. P. JOSSERAND. J.P. GUILHOT. C. AZAIS. J. FARRE.

"- La métrologie des grandeurs acoustiques, aspect fondamental et efficacité.
- L'avenir des appareils analogiques en métrologie acoustique.
- Vers des méthodes numériques de mesure des grandeurs acoustiques".

Colloque CSTB. COMAPI - TOULOUSE - Mars 1969.
Résumé paru dans "Cahiers du CSTB" n° 108 cahier 943. pp. 2 -10. Avril.1970.

8. P. JOSSERAND. J.P. GUILHOT. C. AZAIS.

" Perfectionnement aux sonomètres à grande gamme de mesure et à indicateur logarithmique".

Brevet Français n° PV.69.05.777. mars 1969.

9. P. JOSSERAND.

"Où en est la métrologie des bruits dans l'optique Environnement".

Journées Françaises de l'A.S.T.E. - PARIS - Avril 1969.

10. P. JOSSERAND. C. AZAIS.

"Techniques numériques pour une nouvelle génération de sonomètres".

Journées d'Etudes S.F.E.R.- G.A.L.F - PARIS - Mars 1970

11. P. JOSSERAND. C. AZAIS.J.P. GUILFOT. J. FARRE.

"Acquisition numérique de la mesure des bruits".

Revue d'Acoustique Vol.3. N°9. Avril 1970.

12. P. JOSSERAND.

"Matériaux traditionnels et exigences modernes dans le bâtiment".

Officiel du Bâtiment et des T.P. N° 70.p. 38. mai 1970.

13. P. JOSSERAND.

"La métrologie acoustique moderne".

Université Radiophonique et Télévisuelle Internationale. Octobre 1970.

14. P. JOSSERAND.

"Méthodes et techniques nouvelles pour la mesure des bruits aéronautiques".

2° Colloque Français d'Acoustique Aéronautique - PARIS - Mai 1971. Texte à paraître dans le Revue d'Acoustique.

15. P. JOSSERAND.

"Sur quelques aspects du problème des bruits en milieu urbain".

Colloque H.P. Nuisances de Notre Environnement.-PARIS- Mai 1971. A paraître dans "NUISANCES et ENVIRONNEMENT".

16. P. JOSSERAND.

" Les bruits aéronautiques dans l'Environnement de l'homme. Les efforts de réduction et les solutions au problème."

Journées d'Etudes du VIII° salon Aéronautique et Spatial - TOULOUSE - Juin 1971. A paraître dans la Revue de l'AFITAE.

17. P. JOSSERAND.

"La mesure électronique des grandeurs acoustiques."

"Toute l'Electronique" A paraître.

-=-=-

TRAVAUX SCIENTIFIQUES DU DOMAINE
DE L'ACOUSTIQUE ET DE L'ELECTRONIQUE
REALISES SOUS LA DIRECTION DE L'AUTEUR.

-=-=-

1. A. AMIEL.

"Etude et réalisation d'un générateur de bruit blanc dans la gamme acoustique".

Diplôme d'Etudes Supérieures - TOULOUSE - Juin 1963.

2. R. MARTY.

"Etude et réalisation d'une baie de prise de son transistorisée".

Diplôme d'Etudes Supérieures - TOULOUSE - Juin 1963.

3. F.PADILLA.

"Etude d'un système de compression automatique de dynamique sonore".

Diplôme d'Etudes Supérieures - TOULOUSE - Juin 1963.

4. J. TRINQUES.

"Etude et réalisation d'une unité de réverbération artificielle".

Diplôme d'Etudes Supérieures - TOULOUSE - Décembre 1964.

5. B. LACAZE.

"Conception et réalisation d'un ensemble pour l'étude statistique des bruits de fond dans le spectre acoustique".

Doctorat de 3 ° Cycle. - TOULOUSE - Mars 1966.

6. H. EBRAHIMI.

"Contribution à l'étude du temps de réverbération. Application au calcul des coefficients de Sabine."

Doctorat d'Université - TOULOUSE - Juin 1968.

7. P. DJAFARI PARSA.

"L'apport de l'électroniuqe en thérapeutique de la surdi mutité infantile."

Doctorat d'Université - TOULOUSE - Juin 1968.

8. C. AZAIS.

"Contribution à l'étude de l'Environnement acoustique de l'homme. Etude et réalisation d'un système d'acquisition numérique de la mesure acoustique."

Doctorat de 3° Cycle. - TOULOUSE - Juin 1969.

9. J.P. GUILHOT.

"Convertisseur logarithmique à détection quadratique. Application à la métrologie des bruits acoustiques.

Doctorat de 3° cycle. - TOULOUSE - Juin 1969.

10. D.LAFORE.

"Etude d'un système multiplex pour télémesures codées. Application à la cartographie des bruits acoustiques."

Doctorat de 3° cycle. - TOULOUSE - Juin 1969.

11. A. ROCACHE.

"Contribution à l'étude des générateurs de bruit à haut niveau sonore destinés aux essais de fatigue acoustique."

Doctorat d'Université - TOULOUSE - Décembre 1969.

12. M. HASBI.SAVANE.

"Bruit engendré par les machines volantes".

Diplôme de fin d'études E.N.A.C, section I.N.A. TOULOUSE - Juin 1970.

13. J. GAUDRON.

"Traitement numérique des données physiques en vue de la certification acoustique et de la prévision du bruit des aéronefs".

Doctorat d'Université - TOULOUSE - Janvier 1971.

14. M. SABOUNTCHI.

"Contribution à l'étude des bruits de circulation urbaine. Niveaux relatifs dans les domaines sonore, ultra sonore et infra sonore".

Doctorat d'Université - TOULOUSE - Juin 1971.

-=-=-

Autorisation de soutenance
accordée.
TOULOUSE, le 21 OCT. 1971

Le Président
de l'Université PAUL-SABATIER :

L. LARENG